پژوهش نفت

PETROLEUM RESEARCH

خرداد و تیر ۱۴۰۲

دوماهنامه علمی-پژوهشی/سال سی و سوم/شماره مسلسل ۱۲۹

Volume 33 \ Serial Number 129 \ ISSN 2345-2900

2023(June-July)

ارزیابی ذرات ژل پیش‌ساخته با استفاده از آزمون‌های استاتیک و دینامیک به‌منظور کنترل یکنواختی پیشروی جبهه تزریق
محمد مشیر پناهی، سینا افشارپور، سید مبین فاطمی و محمد حسین غضنفری

استفاده از الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی باران جهت شبیه‌سازی حرکت دوغاب سیال در شکاف و ماتریکس
حجت نوری و علی عالی انور

بررسی روش‌های حرارت‌دهی برروی مقدار و کیفیت نفت تولیدی از نمونه شیل نفتی ایران
حسن نادری، علی شکاری فرد و جابر طاهری شکیب

ارزیابی وضعیت آلودگی هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات پیرامونی اکوسیستم‌های مرجانی (مطالعه موردی: تالاب بین‌المللی شیدور)
مهدی سلطانی، صابر قاسمی و احسان کامرانی

تجزیه طیفی نمودارهای پتروفیزیکی جهت تعیین مرزهای چینه‌نگاری سکانسی سازند دالان وکنگان دریکی ازمیادین گازی جنوب ایران با استفاده از آنالیز موجک و نگاره اینپفا (INPEFA)
سیده اعظم طیبان، علی کدخدایی، مهران آرین، حسین رحیم پوربناب و سید محسن آل علی

مطالعه رخساره‌ها، محیط رسوبی و زون‌بندی مخزن بخش بالایی سازند سورمه (سازند عرب) در یکی از میادین خلیج فارس
علیرضا شاکری، سمیه پرهام و کتایون رضایی‌پرتو

حذف فوتوکاتالیزوری رنگ‌دانه متیلن بلو به‌وسیله غشای نانو الیافی پلی استایرنی حاوی نانولوله‌های TiO_2
نیکو فرجی، مهدی محمودیان و اصغر زمانی

تطابق چینه‌ای زیرسطحی سازند آسماری در میدان آغاجاری و استفاده از آن درکنترل زون بندی مخزن
رضا فتحی ایسوند رضا موسوی حرمی اسدالله محبوبی و علی بهداد

بررسی غلظت و منشا ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) در رسوبات سطحی نوار ساحلی خلیج فارس، در محدوده حاکمیت بندر بوشهر
بهمن کیانی شاهوندی، علی مقیمی کندلوس، مژگان صلواتی و سعید حکیمی آسیابر

مقایسه عملکرد جاذب‌های کلسیمی تهیه‌شده از منابع سنگ‌آهک و پوسته تخم‌مرغ در جذب دی‌اکسیدکربن طی فرآیند چرخه کلسیم و بهبود کارایی آن‌ها
مهری ایمانی، مریم طهماسب پور* و پدرو انریکو سانچز خیمنز

دوماهنامه علمی-پژوهشی، سال سی و سوم، شماره مسلسل ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲

Evaluation of Preformed Particle Gel for Conformance Control Treatment using Static and Dynamic Experiments
Mohammad Moshirpanahi, Sina Afsharpour, Mobeen Fatemi and Mohammad Hossein Ghazanfari

Using the Improved Rain Optimization Algorithm to Simulate the Movement of Two Dominant Fluids in the Fracture and the Matrix
Hojjat Nouri and Ali Alianvari

Experimental Study of the Effects of Heating Type on the Oil Produced from Iranian Oil Shale Samples
Hassan Naderi, Ali Shekarifard and Jaber Taheri-Shakib

The Evaluation on Pollution State of Total Petroleum Hydrocarbons in the Surrounding Sediments of Coral Ecosystems (Case study: Shivdar International Wetland)
Mehdi Soltani, Saber Ghasemi and Ehsan Kamrani

Spectral Analysis of Petrophysical Logs to Determine the Stratal Surfaces of Dalan and Kangan Formation in One of the Gas Fields in Southern Iran using Wavelet Analysis and INPEFA Log
Seyedeh Azam Tayeban, Ali Kadkhodaie, Mehran Arian, Hossain Rahimpour- Bonab and Seyed Mohsen Aleali

Facies Analysis, Depositional Environment and Reservoir Zonation of the Upper Part of Surmeh Formation (Arab Formation) in one of the Persian Gulf Fields
Alireza Shakeri, Somayeh Parham and Katayoon Rezaiee Parto

Photocatalytic Elimination of Methylene Blue by Nanofibrous Polystyrene Membrane Containing TiO_2 Nanotube
Nikoo Faraji, Mehdi Mahmoudian and Asghar Zamani

Sub-surface Stratigraphic Correlation of the Asmari Formation in the Aghajari Oilfield, using in Reservoir Zonation
Reza Fathi Isvand, Reza Moussavi-Harami, Asadollah Mahboubi and Ali Behdad

Investigating Changes in the Concentration and Origin of Hydrocarbon Compounds in the Surface Sediments of the Coastal Strip of the Persian Gulf, in the Authority Area of Bushehr Port
Bahman Kiani Shahvandi, Ali Moghimi Kandelous, Mozhgan Salavati and Saeid Hakimi Asiabar

Comparing the Performance of Calcium-based Adsorbents Prepared from Limestone and Eggshell Resources in CO_2 Capture Calcium Looping Process and Improving their Efficiency
Mehri Imani, Maryam Tahmasebpoor and Pedro Enrique Sánchez-Jiménez





دوماهنامه علمی- پژوهشی
سال سی و سوم، شماره ۱۲۹
خرداد و تیر ۱۴۰۲

صاحب امتیاز: پژوهشگاه صنعت نفت
مدیر مسئول: عظیم کلانتری اصل
سردبیر: محمدرضا احسانی
مدیر اجرایی: طیبه مرادیان
ویراستار: فرهاد رحمانی چیانه
صفحه‌آرایی: نفیسه دلدار و پری‌ناز نوری
چاپ، لیتوگرافی و صحافی: چاپ گنجینه مینیاتور

آدرس:
تهران، بلوار غربی مجموعه ورزشی آزادی، پژوهشگاه صنعت نفت، دفتر مجله پژوهش نفت
صندوق پستی: ۱۳۷-۱۴۶۶۵
تلفن: ۴۸۲۵۲۱۲۹ و ۴۸۲۵۳۲۶۳ نمابر: ۴۴۷۳۹۷۱۲

وبگاه اینترنتی http://journals.ripi.ir
شماره پروانه انتشار: ۱۰۲/۷۹۹۲
ISSN ۲۳۴۵-۲۹۰۰

•مجله پژوهش نفت در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:
•پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)، (www.isc.gov.ir)
•اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (www.sid.ir)
•بانک اطلاعات نشریات کشور (www.magiran.com)
• DOAJ: (www.doaj.org/)
•Chemical Abstracts Service (CAS): (www.cas.org)
•Indexcopernicus: (www. indexcopernicus.com)
•WorldCat: (www.worldcat.org)
•Leibniz Information Centre for Science and Technology (TIB): (www.tib.eu)

پژوهش نفت
دوماهنامه علمی- پژوهشی
سال سی و سوم، شماره ۱۲۹
خرداد و تیر ۱۴۰۲

فهرست عناوین

ارزیابی ذرات ژل پیش‌ساخته با استفاده از آزمون‌های استاتیک و دینامیک به‌منظور کنترل یکنواختی پیشروی جبهه تزریق........ ۳
محمد مشیر پناهی، سینا افشارپور، سید مبین فاطمی* و محمد حسین غضنفری

استفاده از الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی باران جهت شبیه‌سازی حرکت دوغاب سیال در شکاف و ماتریکس........ ۲۴
حجت نوری* و علی عالی انور

بررسی روش‌های حرارت‌دهی برروی مقدار و کیفیت نفت تولیدی از نمونه شیل نفتی ایران........ ۴۳
حسن نادری، علی شکاری فرد* و جابر طاهری شکیب

ارزیابی وضعیت آلودگی هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات پیرامونی اکوسیستم‌های مرجانی (مطالعه موردی: تالاب بین‌المللی شیدور)........ ۵۸
مهدی سلطانی، صابر قاسمی* و احسان کامرانی

تجزیه طیفی نمودارهای پتروفیزیکی جهت تعیین مرزهای چینه‌نگاری سکانسی سازند دالان وکنگان دریکی ازمیادین گازی جنوب ایران با استفاده ازآنالیز موجک و نگاره اینپفا (INPEFA)........ ۷۳
سیده اعظم طیبان، علی کدخدایی*، مهران آرین، حسین رحیم پوربناب و سید محسن آل علی

مطالعه رخساره‌ها، محیط رسوبی و زون‌بندی مخزن بخش بالایی سازند سورمه (سازند عرب) در یکی از میادین خلیج فارس........ ۸۸
علیرضا شاکری، سمیه پرهام* و کتایون رضایی‌پرتو

حذف فوتوکاتالیزوری رنگ‌دانه متیلن بلو به‌وسیله غشای نانو الیافی پلی استایرنی حاوی نانولوله‌های TiO_2........ ۱۰۶
نیکو فرجی، مهدی محمودیان* و اصغر زمانی

تطابق چینه‌ای زیرسطحی سازند آسماری در میدان آغاجاری و استفاده از آن درکنترل زون بندی مخزن........ ۱۲۰
رضا فتحی ایسوند رضا موسوی حرمی* اسداالله محبوبی و علی بهداد

بررسی غلظت و منشا ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) در رسوبات سطحی نوار ساحلی خلیج فارس، در محدوده حاکمیت بندر بوشهر........ ۱۳۶
بهمن کیانی شاهوندی، علی مقیمی کندلوس*، مژگان صلواتی و سعید حکیمی آسیابر

مقایسه عملکرد جاذب‌های کلسیمی تهیه‌شده از منابع سنگ‌آهک و پوسته تخم‌مرغ در جذب دی‌اکسیدکربن طی فرآیند چرخه کلسیم و بهبود کارایی آن‌ها........ ۱۴۸
مهری ایمانی، مریم طهماسب پور* و پدرو انریکو سانچز خیمنز

راهنمایی تهیه مقالات........ ۱۶۳

ارزیابی ذرات ژل پیش‌ساخته با استفاده از آزمون‌های استاتیک و دینامیک به‌منظور کنترل یکنواختی پیشروی جبهه تزریق

محمد مشیر پناهی، سینا افشارپور، سید مبین فاطمی* و محمد حسین غضنفری
دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

چکیده

تزریق ذرات ژل پیش ساخته به مخازن شکاف‌دار یکی از مؤثرترین روش‌ها در کاهش تولید آب ناخواسته و افزایش برداشت نفت محسوب می‌شود. در این پژوهش یک نمونه از ذرات ژل پیش ساخته به‌روش پلیمریزاسیون رادیکال آزاد سنتز شده است و عملکرد آن در عملیات کنترل یکنواختی جبهه تزریقی ارزیابی شده است. ذرات ژل پیش ساخته با اندازه مش ۵۰-۴۰ که در آب دریای ۱۰۰ بار رقیق شده متورم شده‌اند، بیشترین ظرفیت تورم را از خود نشان دادند. حضور تنها ۰/۸ ٪ وزنی نانوسیلیکا در ساختار ژل‌ها سبب افزایش پایداری آنها در برابر افزایش شوری و حضور گاز کربن دی اکسید می‌شود، به‌طوری‌که ذرات ژل تا هفته‌ها بیش از ۸۰٪ از آب اولیه خود را حفظ می‌کنند. حضور اجزای نفتی قابل حل در آب به علت دارا بودن گروه‌های آلی آبدوست منجر به افزایش ۶ واحدی نسبت تورم ذرات ژل می‌شود. در ادامه عملکرد ژل پیش ساخته در انسداد شکاف توسط سیستم هل-شاو سل بررسی شد. ژل‌های جای گرفته در شکاف محیط متخلخل جدیدی را با تراوایی به مراتب کمتر از شکاف اولیه ایجاد می‌کنند. توانایی ژل برای حفظ تراوایی محیط متخلخل تشکیل شده، به دبی آب تزریقی ثانویه، شوری و اندازه ذرات ژل وابسته است. تزریق آب ثانویه به شکاف پس از جایگیری ژل‌ها، مسیرهای کرمچاله مانندی را برای حرکت سیال در میان شبکه ژل باز می‌کند و هرچه دبی تزریقی بیشتر باشد مقاومت شبکه ژل در برابر جریان آب کاهش می‌یابد. افزایش نسبت انطباق ذرات ژل (نسبت قطر ذرات ژل متورم شده به عرض شکاف) تا مقدار ۲/۹، منجر به افزایش مقاومت شبکه ژل در مقابل جریان آب می‌شود. اما ذرات با نسبت انطباق ۲/۹ به بالا، به علت شکسته شدن مقاومت کمتری در برابر جریان آب ایجاد می‌کنند. این نسبت انطباق بحرانی، مستقل از خواص ژل و شرایط تزریقی است. شبکه ژل متورم شده در آب شورتر مقاومت بالاتری در برابر جریان آب دارد درحالی‌که تزریق ثانویه آب کمشورتر هرچند قدرت ژله‌ای ژل‌ها را کاهش می‌دهد، اما منجر به افزایش مقاومت ژل‌ها در برابر جریان آب می‌شود. در نهایت تأثیر روش تزریق ژل در کاهش تولید آب و افزایش تولید نفت در میکرومدل شکاف‌دار بررسی شده است. روش درمان با ژل منجر به انسداد شکاف شده و ضریب بازیافت نفت ماتریس از مقدار ۲۹٪ در مرحله سیلاب زنی اولیه به ۹۴٪ در مرحله سیلاب‌زنی ثانویه افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ذرات ژل پیش ساخته، کنترل یکنواختی جبهه تزریق، ظرفیت تورم، هل-شاو سل، میکرومدل

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی fatemi@sharif.edu
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4728.3123)

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۲۳-۳

مقدمه

تولید آب اضافی و ناخواسته یک مشکل جدی در مخازن نفتی بالغ محسوب می‌شود به‌طوری‌که میزان برش آب این میادین تا ۸۰٪ نیز می‌رسد. آب تولیدی می‌تواند شامل آب سازندی، آب تزریقی و یا آب میعان یافته باشد. آب تولیدی همراه نفت موجب خوردگی تجهیزات سر چاهی، ایجاد معضلات زیست محیطی و کاهش عمر اقتصادی چاه‌ها می‌شود. در نتیجه به‌منظور جلوگیری از تماس با آب ممکن است لایه‌های تولیدی نفت، علی‌رغم وجود حجم زیادی از هیدروکربن‌های قابل بازیافت در آنها، رها شوند [۱]. ناهمگنی مخازن اصلی‌ترین عامل تولید آب اضافی ناخواسته از میادین نفتی است. شکاف‌ها و یا کانال‌ها (طبیعی یا القا شده به‌صورت مصنوعی) نمونه‌هایی از ناهمگنی موجود در مخازن هستند که باعث تولید آب اضافی و کاهش بازیافت نفت می‌شوند. در عملیات سیلاب‌زنی به مخازن، آب تزریقی می‌تواند از طریق این مسیرها به‌سمت چاه‌های تولیدی جریان یابد و بخش زیادی از نفت را جای بگذارد [۲ و ۳]. بنابراین انتخاب استراتژی‌های تولیدی و مدیریتی مخزن در نهایت بر روش‌های بازیافت نفت نیز تأثیر می‌گذارند. مسدود کردن شکاف‌ها و کانال‌ها یا به‌عبارت دیگر کم کردن ناهمگنی مخازن، راه حلی مناسب برای کاهش تولید آب و افزایش تولید نفت است. به این منظور، روش‌هایی اعم از تزریق پلیمر، تزریق سورفکتانت، و تزریق فوم به‌صورت گسترده انجام شده‌اند [۴]. یکی از روش‌های مؤثر در کاهش تولید آب، تزریق پلیمرژل‌ها به مخزن با هدف کاهش تراوایی شکاف و یا کانال‌ها و تغییر مسیر سیال تزریقی (آب) به نواحی جاروب نشده (ماتریس) است. به این فرآیند کنترل یکنواختی جبهه[1] گفته می‌شود [۷-۵]. تاکنون پلیمرژل‌های مختلفی برای عملیات کنترل یکنواختی جبهه مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در اکثر موارد از ژل‌های درجا به‌طور گسترده استفاده شده است [۸ و ۹].

اولین پلیمرژل‌های درجا به‌وسیله پلی آکریل آمید جزئی هیدرولیز شده[2] (HPAM) و آلومینیوم سیترات توسط شرکت فیلیپس سنتز و معرفی شدند [۱۰]. سیستم‌های ژل درجا دارای دو مؤلفه اصلی شامل پلیمرهای با وزن مولکولی بالا و اتصال‌دهنده‌های عرضی هستند که به آنها ژل ساز[3] می‌گویند. هنگامی‌که اتصال بین زنجیرهای پلیمری اتفاق می‌افتد، پیونددهنده عرضی دو مولکول پلیمر مجاور را به‌صورت شیمیایی یا فیزیکی به هم متصل می‌کند. در نتیجه یک شبکه سه بعدی تحت شرایط مخزن تشکیل می‌شود. این شبکه ضمن حفظ خصوصیات ماکروسکوپی شبه-جامد، دارای رفتار شبه-مایع در مقیاس مولکولی است. با توجه به خواص پیونددهنده عرضی، آنها را می‌توان به دو دسته فلزی و آلی تقسیم کرد [۱۱ و ۱۲]. زمان ژل شدن و عمق نفوذ این نوع ژل در مخزن غیر قابل پیش بینی است و از این رو امکان تزریق ژل در لایه‌های خاص یا دوردست از چاه‌های تزریق را فراهم نمی‌کند. سایر محدودیت‌های این سیستم شامل تجزیه ناشی از تنش برشی، رقیق شدن با آب سازندی و نشت ترکیبات ژل ساز در طول تزریق ژل است [۱۵-۱۳].

برای رفع محدودیت‌های ژل درجا، در سال‌های اخیر ژل‌های ذره‌ای پیش ساخته (PPG)[4] برای کنترل یکنواختی جبهه در نقاط دور دست مخزن استفاده شده‌اند. ذرات ژل پیش‌ساخته یک ذره پلیمری سوپر جاذب است که در حضور آب می‌توانند تا بیش از ۲۰۰ برابر اندازه اولیه خود متورم شود. برخلاف ژل‌های درجا، ژل پیش ساخته قبل از تزریق به درون مخزن در سطح زمین ساخته می‌شود، بنابراین واکنش ژل شدن در مخزن رخ نمی‌دهد. این ژل‌ها معمولاً در هنگام تزریق تنها یک جزء دارند.

1. Conformance Control
2. Partially Hydrolyzed Poly Acryl Amide
3. Gelant
4. Preformed Particle Gels

و حساسیت کمی به شرایط فیزیکی و شیمیایی مخزن مانند pH، شوری، یون‌های چند ظرفیتی، سولفید هیدروژن، دما و نرخ برشی دارند [۱۶ و ۱۷]. ذرات ژل پیش ساخته به‌صورت تجاری در اندازه‌های مختلف، از جمله ژل پیش ساخته در اندازه میکرومتر تا میلی‌متر [۱۴]، در انواع مختلفی نظیر میکروژل‌ها [۱۸]، پلیمرژل‌های حساس به pH [۱۹] و پلیمرژل‌های حساس به دما [۲۰] وجود دارد. یکی از عوامل مؤثر در عملکرد ذرات ژل پیش ساخته، نسبت تورم[1] آن است. نسبت تورم ژل به‌میزان و نوع شوری آب، اجزای سازنده ژل، دما و درجه pH وابسته است. اگر شوری آب کاهش یابد، نسبت تورم ژل پیش ساخته به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. بالا بودن نسبت تورم حجم ژل را افزایش می‌دهد و در مقابل مقاومت ژل را نیز کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که ذرات ژل به آسانی از طریق شکاف‌ها و کانال‌ها به نقاط دور دست مخزن منتقل شوند [۱۶]. غلظت اتصال‌دهنده عرضی تأثیر به‌سزایی بر نسبت تورم ذرات ژل پیش ساخته می‌گذارد. عباسی و همکاران بیان کردند که نسبت تورم ژل‌ها با افزایش غلظت اتصال‌دهنده عرضی ابتدا افزایش (به علت تقویت پیوند عرضی میان زنجیرهای پلیمری) و سپس کاهش می‌یابد (به علت مصرف شدن بیش از حد گروه‌های عاملی آبدوست در ساختار ژل). همچنین استفاده از نانوذرات آبدوست سیلیکا سبب افزایش نسبت تورم ذرات ژل می‌شود [۲۱] درحالی‌که استفاده از نانوذرات گرافن به علت مصرف گروه‌های عاملی آبدوست در فرآیند اتصال عرضی، موجب کاهش ظرفیت تورم ذرات ژل می‌شوند [۲۲]. کاهش جریان آب در شکاف‌ها و یا کانال‌های با تراوایی بسیار بالا در عملیات درمان با ژل، در مطالعات بسیاری توسط پژوهش‌گران بررسی شده است. به‌منظور بهینه‌سازی عملیات درمان با ژل، بررسی رفتارهای مختلف ژل مانند تزریق‌پذیری[2]، پیشروی[3]، انسداد شکاف[4] و از دست دادن آب[5] هنگام انتشار آن در شکاف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

سرایت ساز و کارهای انتقال ژل پیش ساخته کروم (III) استات-HPAM را در مغزه‌های شکاف دار بررسی کرد و بیان کرد که در حین انتشار ژل‌ها در شکاف، بخش زیادی از آب جذب شده ژل از ساختار آن خارج شده و وارد ماتریس می‌شود، بنابراین ژل باقی‌مانده در شکاف تشکیل یک کیک خارجی ناتراوا را روی سطح ماتریس می‌دهد [۲۳]. همچنین در کارهای دیگری توسط سرایت بیان شد که کاهش عرض شکاف و کاهش دبی تزریقی ژل سبب افزایش از دست دهی آب ژل‌ها شده و در نتیجه حجم ژل بیشتری برای عملیات تزریق مورد نیاز می‌شود [۲۴ و ۲۵]. عوامل متعددی مانند دبی تزریقی، شوری آب، عرض شکاف، قدرت ژله‌ای[6] ژل پیش ساخته و اندازه ذرات آن بر بازدهی انسداد شکاف توسط ژل پیش ساخته مؤثرند. ژَنگ و بای با بررسی عملکرد ذرات ژل پیش ساخته در انسداد شکاف بیان کردند که افزایش دبی آب تزریقی ثانویه سبب شسته شدن ژل‌ها و ایجاد مسیرهای بزرگتری برای عبور آب در شکاف می‌شود و به این دلیل ضریب مقاومت باقی‌مانده[7] کاهش می‌دهد. افزایش شوری آب ژل‌ها موجب افزایش قدرت ژله‌ای آنها شده و در نتیجه انسداد شکاف بهبود می‌یابد. افزایش عرض شکاف نیز تأثیر قابل توجهی در بهبود انسداد شکاف دارد که نشان دهنده بازدهی بالاتر عملیات درمان با ژل در محیط‌هایی با ناهمگنی بیشتر است [۲۶]. ایمقام و همکاران رفتار فشار آستانه[8] ذرات ژل پیش ساخته را در مجراهای لوله‌ای بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش قدرت ژله‌ای و افزایش اندازه ذرات سبب افزایش فشار آستانه حرکت ژل در مجرا می‌شود.

1. Swelling Ratio
2. Injectivity
3. Propagation
4. Plugging
5. Dehydration
6. Gel Strength
7. Residual Resistance Factor
8. Threshold Pressure

در این بین قدرت ژله‌ای ژل پیش ساخته به‌میزان قابل توجهی بیشتر از نسبت اندازه ذرات به اندازه گلوگاه بر تزریق‌پذیری ژل پیش ساخته تأثیر می‌گذارد [۲۷]. در بررسی‌های دیگری توسط ایمقام و بای بیان شد که ژل پیش ساخته، شکاف‌ها و کانال‌ها را کاملاً مسدود نمی‌کند بلکه در طول شکاف یک محیط متخلخل جدیدی را ایجاد می‌کند که تراوایی این محیط متخلخل به دبی تزریقی آب و خواص الاستیسیته ژل وابسته است [۲۸]. عباسی و همکاران با بررسی عملکرد ذرات ژل پیش ساخته در انسداد شکاف بیان کردند که ذرات بزرگ‌تر بازدهی انسداد بهتری در شکاف ایجاد می‌کنند اما مخلوط ذرات ریز و درشت به‌علت مرتب‌سازی[1] بهتر بیشترین میزان انسداد را ایجاد می‌کند. همچنین ایشان دریافتند که تزریق آب کمشور ثانویه سبب افزایش نسبت تورم ذرات جای گرفته در شکاف می‌شود و به این ترتیب سبب بهبود انسداد شکاف می‌شود [۲۱]. پاپروسچی و همکاران با به کارگیری سیلیکات سدیم و نانوگرافن در سنتز ذرات ژل پیش ساخته، پایداری آنرا در برابر شوری، pH و دما افزایش دادند. ایشان بیان کردند این نوع از ژل‌ها در عملیات انسداد شکاف نسبت به ژل‌های فاقد نانوذرات گرافن و سیلیکات سدیم، موفق تر عمل می‌کنند و حتی در شوری‌های پایین ضریب مقاومت باقی‌مانده بالاتری ایجاد می‌کنند [۲۲]. تاکنون مطالعات کمی برای ارزیابی عملکرد و ساز و کارهای پیشروی ذرات ژل پیش ساخته در سازندهای با تراوایی بالا و شکاف‌ها انجام شده است. همچنین، مطالعات دیداری ساز و کارهای پیشروی ژل در درون شکاف‌ها و همچنین در محیط‌های متخلخل ناهمگن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش ابتدا تأثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت تورم ذرات ژل پیش ساخته و پایداری آنها بررسی می‌شود. در ادامه مطالعات آزمایشگاهی بیشتری برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر توانایی ذرات ژل پیش ساخته در انسداد شکاف در برابر جریان آب به‌صورت کمی و کیفی (دیداری) انجام شد. در نهایت نیز مقدار افزایش ضریب بازیافت نفت، حاصل از به کار بردن عملیات تزریق ژل و تزریق آب کم شور در میکرومدل ناهمگن بررسی شده است.

روش پژوهش

تهیه ذرات ژل پیش ساخته

در این پژوهش ذرات ژل پیش ساخته با روش پلیمریزاسیون رادیکال آزاد در آزمایشگاه سنتز شدند. شکل ۱ به‌صورت شماتیک فرآیند لازم برای سنتز ژل پیش ساخته را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شماتیک مراحل ساخت و مواد لازم برای سنتز ژل پیش ساخته

1. Sorting

مراحل زیر در سنتز ذرات ژل پیش ساخته انجام می‌شوند:

• تهیه محلول آبی کاملاً یکنواخت متشکل از ۶۷/۴۷٪ آب دوبار تقطیر شده، ۲۷/۶٪ مونومر اکریل آمید و ۳/۴۱٪ مونومر ۲-اکریل آمید ۲-متیل پروپان سولفونیک اسید سدیم.

• ۰/۳۶٪ نانوذرات رس (سدیم مونت موریلونایت) و ۰/۸٪ نانوذرات سیلیکا به‌عنوان عامل استحکام دهنده به محلول اضافه می‌شوند که به‌روش اولتراسونیک در محلول پایدار شده و پس از آن ظرف حاوی محلول به‌مدت 15 min برروی همزن مغناطیسی قرار داده می‌شود.

• ۰/۱٪ پلی اتیلن گلیکول دی اکریلات به‌عنوان اتصال‌دهنده عرضی و ۰/۲۱٪ آمونیوم کلراید به‌عنوان عامل تورم‌دهنده به محلول اضافه می‌شوند و به‌مدت 60 min برروی همزن مغناطیسی قرار داده می‌شوند. در این مرحله عملیات پاکسازی با نیتروژن برای تخلیه اکسیژن از محیط واکنش انجام می‌شود.

• در مرحله آخر ۰/۰۵٪ پتاسیم پرسولفید به‌عنوان آغازگر واکنش به محلول اضافه می‌شود و دمای ظرف واکنش برروی 40 °C تنظیم می‌شود. واکنش ژلی شدن به‌مدت 15 min انجام می‌شود. ژل پیش ساخته تشکیل شده به‌مدت 24 h در آب مقطر قرار داده می‌شود تا مونومرهای واکنش نداده از ژل خارج شوند.

• ژل تشکیل شده در کوره‌ای با دمای 75 °C به‌مدت 24 h قرار می‌گیرد تا کاملاً خشک شود و سپس به‌وسیله خردکن پودر شده و برای دسته‌بندی ذرات ژل در اندازه‌های مورد نظر الک می‌شود.

در این پژوهش از حرارت دادن به‌عنوان کاتالیزور واکنش استفاده شده است. در روش‌های مرسوم سنتز از کاتالیزگر تترا متیل اتیلن دی آمین[1] (TEMED) استفاده می‌شود که باعث افزایش سرعت واکنش ژلی شدن و بالارفتن دمای ظرف واکنش تا نزدیک به 100 °C می‌شود. وقتی که واکنش پلیمریزاسیون سریع انجام شود بسیاری از مونومرها فرصت پیوند یافتن را نمی‌یابند و به‌صورت مونومرهای جدا از هم در ظرف واکنش باقی می‌مانند. این امر باعث کاهش مقاومت استحکامی ژل پیش ساخته می‌شود.

آزمایشات بالک

در این آزمایشات پس از تورم کامل ژل پیش ساخته در محلول آبی، نسبت تورم آن به‌صورت حجمی توسط رابطه ۱ تعیین می‌شود.

$$SR = \frac{V_s - V_d}{V_d} \quad (1)$$

که در آن SR نسبت تورم، V_s حجم ژل متورم شده و V_d حجم ژل خشک است. جهت بررسی ظرفیت تورم ژل پیش ساخته، نمونه‌ی آب سازندی یکی از مخازن نفتی جنوب ایران و آب دریای خلیج فارس مطابق جدول ۱ در آزمایشگاه تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. هنگامی که ژل ذره‌ای پیش ساخته به مخزن تزریق می‌شود، در شرایط متفاوتی نسبت به سطح زمین قرار می‌گیرد و یا حتی خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات ژل نیز دست‌خوش تغییراتی می‌شوند که می‌تواند بر عملکرد ژل تأثیر بگذارد. بنابراین در این آزمایشات تأثیر شوری، اندازه ذرات ژل، دما، pH، و اجزا نفتی قابل حل[2] (WSF) بر ظرفیت تورم ژل مطالعه می‌شوند.

جدول ۱ درصد ترکیب اجزای سازنده آب سازندی و آب دریا

نمک	$CaCO_3$	$NaHCO_3$	Na_2SO_4	$CaCl_2$	$MgCl_2$	KCl	NaCl	TDS (ppm)
آب سازندی (٪)	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۵۱	۴/۴۴	۰	۱۱/۴۱	۱۶۸۷۲۵
آب دریا (٪)	۰	۰/۰۰۹	۰/۴۲۸	۰/۱۷۴	۱/۳۰۹	۰/۰۷۶	۲/۷۰۷	۴۷۰۲۷

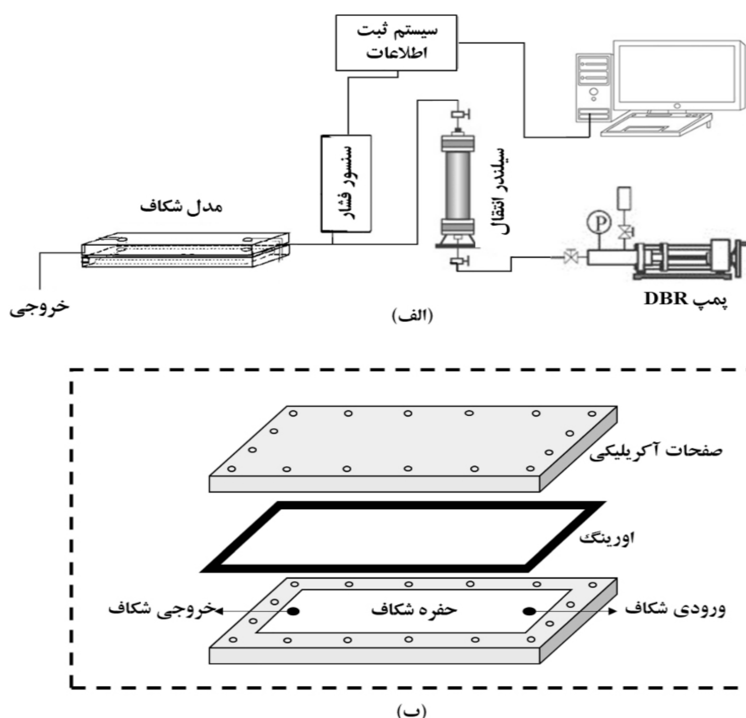
1. Tetramethylethylenediamine
2. Water Soluble Fractions (WSF)

همچنین پایداری ژل متورم شده در برابر افزایش شوری و حضور گاز کربن دی اکسید نیز بررسی می‌شود. آزمایشات اندازه‌گیری نسبت تورم نمونه ژل پیش ساخته در فشار ۱ atm و دمای اتاق انجام شده‌اند.

آزمایشات هل شاو سل

در این قسمت از آزمایشات، عملکرد ژل در انسداد شکاف با استفاده از دستگاه هل-شاو بررسی شده است. شکل ۲ تجهیزات لازم برای انجام آزمایشات دینامیک ژل پیش ساخته در سیستم هل-شاو سل را نشان می‌دهد. این سامانه شامل پمپ DBR، سیستم ثبت اطلاعات فشار، سیلندر انتقال و مدل شکاف است. مدل شکاف شبیه‌سازی شده متشکل از دو صفحه شفاف آکریلیکی است که روی یکی از آنها شکاف با استفاده از لیزر حک شده است. از پیچ و مهره برای محکم کردن دو صفحه استفاده می‌شود و فضای شکاف به‌وسیله یک اورینگ مناسب آب‌بندی شده است. دو شیر ورودی و خروجی برای تزریق و تولید سیالات روی مدل نصب شده است. شماتیکی از دستگاه هل شاو و نحوه ساخت آن در شکل ۲ نشان داده شده است. طول شکاف ۴۰ cm و عرض آن ۱۰ cm است. حجم فضای خالی شکاف ۷۶ cm است و فاصله بین دو صفحه که بیانگر عرض شکاف است برابر با ۱/۹ mm است. سناریو تزریق در این آزمایشات شامل ۳ مرحله است. ابتدا ۲ حجم حفره[1] (PV) آب دریا با دبی ۴ cc/min به شکاف تزریق می‌شود. سپس ۲ حجم حفره ژل متورم شده با دبی ۴ cc/min به شکاف تزریق می‌شود. پس از قرارگیری ژل‌ها در شکاف به‌منظور بررسی عملکرد انسداد آنها، ۵ حجم حفره شوراب به ترتیب با دبی‌های ۱، ۲، ۴ و ۸ cc/min به شکاف تزریق می‌شود. برای ارزیابی مقاومت ژل در برابر جریان آب از پارامتر ضریب مقاومت باقی‌مانده[2] (Frr) استفاده می‌شود که به‌صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$F_{rr} = \frac{\Delta P_a}{\Delta P_b} \qquad (۲)$$



شکل ۲ دستگاه آزمایشات هل شاو سل: الف) ستاپ آزمایشگاهی و ب) شماتیک مدل شکاف

1. Pore Volume
2. Residual Resistance Factor

که در آن ΔP_a اختلاف فشار پایدار شده جریان سیال در دو سر شکاف بعد از قرارگیری ژل و ΔP_b اختلاف فشار جریان سیال در دو سر شکاف قبل از قرارگیری ژل است. همچنین پس از تزریق شوراب ثانویه در هر دبی تزریقی، تراوایی شبکه ژل به‌کمک رابطه دارسی مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{q\mu L}{A\Delta P_a} \qquad (۳)$$

که در آن k تراوایی شبکه ژل پیش ساخته برحسب دارسی، q دبی تزریقی برحسب سانتی‌متر مکعب بر ثانیه، μ ویسکوسیته سیال تزریقی برابر با ۱ سانتی‌پویز، L طول سیستم برابر با ۴۰ cm، A سطح مقطع جریان برابر با ۱/۹ cm^2 و ΔP_a فشار تزریق پایدار شده برحسب اتمسفر است. پارامتر دیگری که برای ارزیابی عملکرد ژل در انسداد شکاف اندازه‌گیری می‌شود، فشار میان‌شکافت[1] است که عبارت است از بیشترین فشار تزریقی که شبکه ژل بدون فروپاشی می‌تواند در برابر جریان آب تحمل کند. همچنین تصاویر نحوه حرکت ژل و آب تزریقی ثانویه از مدل شکاف ثبت و گزارش می‌گردند. در این آزمایشات تأثیر اندازه ذرات ژل پیش ساخته، شوری آب مورد استفاده در متورم کردن ژل، شوری آب تزریقی ثانویه و دبی تزریقی آن بر عملکرد ژل در انسداد شکاف بررسی شده است آزمایشات هل شاو سل در دمای محیط انجام شده‌اند و فشار خروجی هل شاو سل برابر با فشار محیط است. جدول ۲ طراحی آزمایشات سیستم هل شاو سل را نشان می‌دهد. منظور از نسبت انطباق[2] (Rp) نسبت قطر ذرات ژل متورم شده به عرض شکاف است. برای تعیین قطر ذرات از میانگین قطر کوچک و بزرگ آنها استفاده می‌شود.

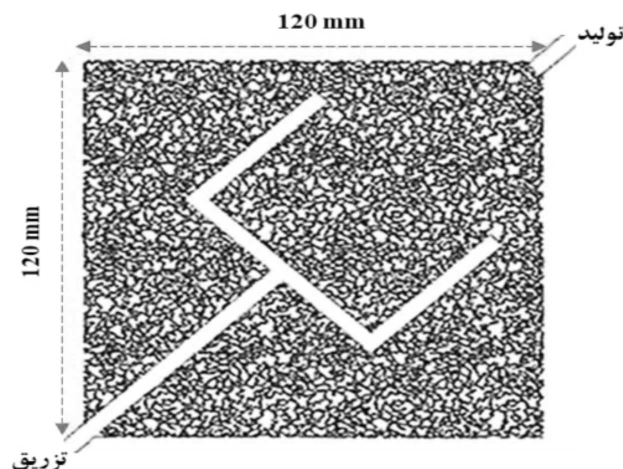
آزمایشات میکرومدل

در این پژوهش از میکرومدل ناهمگن شکاف‌دار برای مطالعه کاربرد ذارت ژل پیش ساخته در کاهش (قطع) تولید آب و افزایش بازیافت نفت استفاده شده است. برای ساختن میکرومدل ابتدا توسط نرم‌افزار Corel Draw طرح محیط متخلخل ناهمگن طراحی شده با استفاده از برش لیزری روی شیشه حکاکی می‌شود، سپس سطح شیشه حکاکی شده توسط شیشه‌ی دیگری پوشانده می‌شود. شکل ۳ الگوی میکرومدل ناهمگن استفاده شده را نشان می‌دهد. این مدل برگرفته از الگوی تزریق و تولید ۵ نقطه‌ای است که تزریق سیالات از طریق شکاف صورت می‌گیرد. طرح شکاف در این مدل به‌صورت یک شکاف دو شاخه انتخاب شده است تا بتوان امکان تغییر جهت جریان ذرات ژل و قرارگیری آنها در شبکه شکاف غیر ممتد را مورد بررسی قرار داد و در ضمن ناحیه شکافدار در بخش وسیع‌تری از محیط متخلخل گسترده شود.

جدول ۲ طراحی آزمایشات دینامیک در سیستم هل-شاو سل

شماره آزمایش	اندازه ذرات ژل خشک (مش)	اندازه ذرات ژل خشک (mm)	نسبت انطباق	شوراب مورد استفاده در تورم ژل	شوراب تزریقی ثانویه	دبی آب تزریقی ثانویه (cc/min)
۱	۱۶-۱۲	۱/۱۸– ۷/۱	۲/۹	آب دریا	آب دریا	
۲	۱۶-۱۲	۱/۱۸– ۷/۱	۲/۹	آب دریا ۱۰۰ بار رقیق شده	آب دریا	
۳	۱۶-۱۲	۱/۱۸– ۷/۱	۲/۹	آب دریا	آب دریا ۱۰۰ بار رقیق شده	
۴	۲۰-۱۸	۰/۸۵– ۱	۱/۹	آب دریا	آب دریا	
۵	۳۰-۲۰	۰/۶– ۰/۸۵	۱/۳	آب دریا	آب دریا	
۶	۵۰-۴۰	۰/۳– ۰/۴۲۵	۰/۷	آب دریا	آب دریا	۱،۲،۴،۸

1. Breakthrough Pressure
2. Matching Size Ratio



شکل ۳ الگوی میکرومدل ناهمگن دارای شکاف و ماتریس

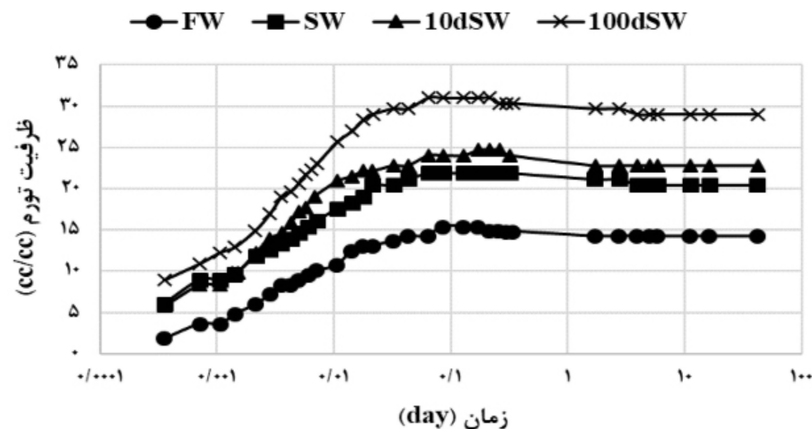
تخلخل مدل ناهمگن طراحی شده برابر ۳۸٪، حجم حفره آن ۰/۷۱۱ cc، میانگین قطر حفرات و گلوگاه‌ها به‌ترتیب برابر ۲۵۰ و ۱۴۰ میکرومتر و عرض شکاف در آن برابر ۵ mm است. در این آزمایش ابتدا میکرومدل کاملا از نفت اشباع می‌شود و برای ایجاد ترشوندگی نفت-دوست در آن تحت فرآیند پیرسازی با نفت خام در دمای ۸۰ °C قرار می‌گیرد. سناریوهای تزریق مشابه با آزمایشات هل-شاو سل دارای ۳ مرحله است. در ابتدا ۴ حجم حفره آب دریا ۱۰۰ بار رقیق شده با دبی ۰/۰۰۱ cc/min به مدل تزریق می‌شود تا وقتی که نفتی از خروجی تولید نشود. پس از آن ژل متورم شده به‌منظور انسداد شکاف با دبی ۰/۰۰۵ cc/min تزریق می‌شود. در مرحله آخر به‌منظور بررسی عملکرد ژل‌ها در کنترل یکنواختی جبهه، آب کم‌شور ثانویه با دبی ۰/۰۰۱ cc/min به مدل تزریق می‌شود. آزمایشات میکرومدل در دما و فشار محیط انجام شده‌اند، هدف این بخش مشاهده ساز و کارهای انتشار ذرات ژل پیش ساخته در محیط متخلخل شکاف‌دار است.

نتایج و بحث

آزمایشات نسبت تورم

تأثیر شوری بر ظرفیت تورم

برای اندازه‌گیری تأثیر شوری بر ظرفیت تورم ژل، از آب سازندی (FW)، آب دریا (SW)، آب دریا ۱۰ بار رقیق شده (۱۰ dsw) و آب دریا ۱۰۰ بار رقیق شده (۱۰۰ dsw) استفاده شد. در این مرحله، از ذرات ژل پیش ساخته با اندازه مش ۴۰-۵۰ (۲۹۷ µm تا ۴۰۰ µm) استفاده شد. نتایج آزمایشات در شکل ۴ نشان داده شده است. وقتی که ذرات ژل پیش ساخته در تماس با آب قرار می‌گیرند، گروه‌های عاملی آمیدی در آنها هیدرولیز شده و سبب تشکیل گروه‌های کربوکسیلیک آبدوست در زنجیرهای پلیمری می‌شوند. در ابتدا بنابر اختلاف فشار اسمزی بین آب و ژل، مولکول‌های آب می‌توانند به ساختار ژل نفوذ کنند و جذب گروه‌های کربوکسیلیک آبدوست شوند و از این رو حجم ذرات ژل افزایش می‌یابد. با گذر زمان فشار اسمزی مربوط به الاستیسیته شبکه ژل نیز افزایش می‌یابد تا جایی که با اختلاف فشار اسمزی بین آب و ژل برابر شود [۲۹]. بنابراین پس از گذشت مدت تقریبی ۲/۴ h ظرفیت تورم ژل‌ها به پایداری می‌رسد و برای مدت زمان طولانی ثابت می‌ماند که بیانگر پایداری مناسب ژل پیش ساخته است. بر طبق نتایج، نسبت تورم ژل پیش ساخته پس از قرار گرفتن در آب دریا به مقدار ۲۰ می‌رسد. با ۱۰ برابر و ۱۰۰ برابر رقیق کردن آب دریا، نسبت تورم ژل در این محلول‌ها به‌ترتیب ۲۳ و ۲۹ می‌شود.



شکل ۴ ظرفیت تورم ژل پیش ساخته سنتز شده در شوراب‌های مختلف

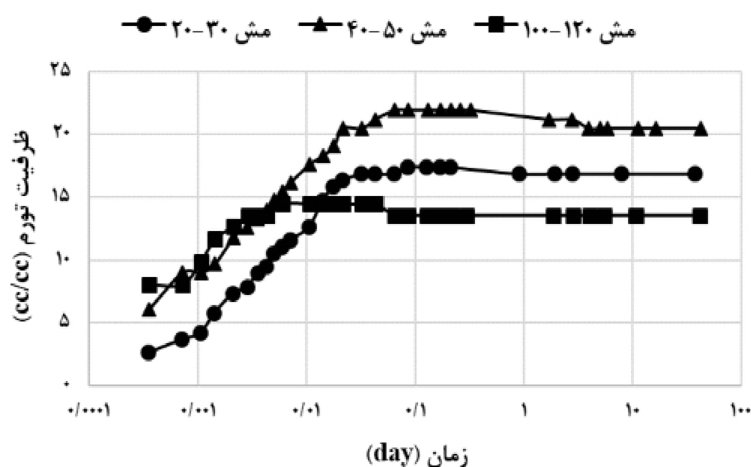
بنابراین با کاهش شوری ظرفیت تورم ژل افزایش می‌یابد. همچنین از نتایج شکل ۴ در می‌یابیم که ژل پیش ساخته در آب دریا در مقایسه با آب سازندی بیشتر متورم می‌شود. به‌علت وجود نیروی دافعه بین زنجیرهای پلیمری که از بار سطحی گروه‌های عاملی آبدوست ناشی می‌شود، یک فضای متخلخل و سه بعدی در ساختار ژل تشکیل می‌شود که این حفرات محل استقرار مولکول‌های آب هستند. در واقع مولکول‌های قطبی آب به علت بار سطحی مثبت روی اتم اکسیژن خود، می‌توانند جذب گروه‌های کربوکسیلیک آبدوست روی زنجیرهای پلیمری شوند [۱۶]. با افزایش غلظت نمک، کاتیون‌های موجود در محلول خصوصاً کاتیون‌های دو ظرفیتی، بیشتر به ساختار ژل نفوذ می‌کنند و سبب مصرف شدن تعداد بیشتری از گروه‌های کربوکسیلیک آبدوست می‌شوند، بنابراین آب کمتری به ساختار ژل نفوذ می‌کند و ظرفیت تورم آن کاهش می‌یابد.

تأثیر اندازه ذرات بر ظرفیت تورم

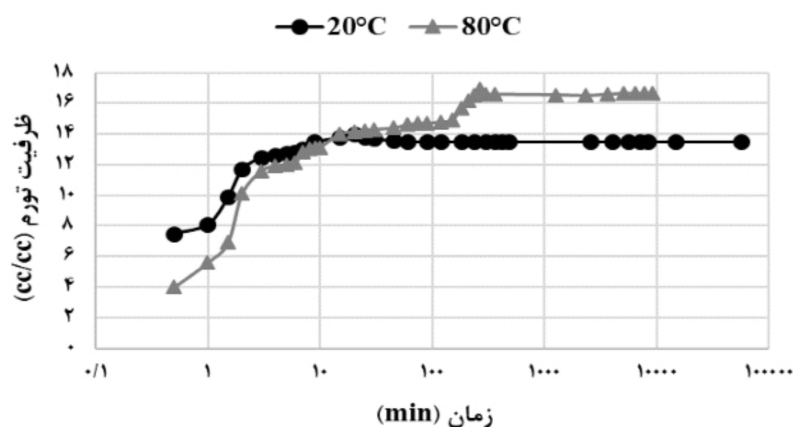
برای بررسی تأثیر اندازه ذرات ژل پیش ساخته بر ظرفیت تورم آن، آزمایشات اندازه‌گیری ظرفیت تورم ذرات ژل با اندازه مش ۳۰-۲۰ (۵۹۵ μm تا ۸۴۱ μm)، ۵۰-۴۰ (۲۹۷ μm تا ۴۰۰ μm) و ذرات با اندازه مش ۱۲۰-۱۰۰ (۱۲۵ μm تا ۱۴۹ μm) استفاده شده است. شوراب مورد استفاده در این مرحله آب دریا است که نتایج این آزمایشات در شکل ۵ آمده است. بر طبق نتایج هنگامی‌که اندازه ذرات از مش ۳۰-۲۰ تا مش ۵۰-۴۰ ریزتر می‌شوند، به‌دلیل افزایش نسبت سطح به حجم ذرات ظرفیت تورم ژل افزایش می‌یابد. می‌دانیم که آب به درون حفرات پلیمری و سطح ذرات جذب می‌شود. بنابراین با افزایش سطح ذرات ژل، ظرفیت تورم آن افزایش می‌یابد. وقتی که ذرات ژل بیش از اندازه خرد می‌شوند (مش ۱۰۰-۱۲۰) باعث می‌شود که تعدادی از حفرات پلیمری موجود در شبکه سه بعدی ژل خرد شوند و قابلیت حبس آب را از دست بدهند، بنابراین ظرفیت تورم آنها کاهش می‌یابد. در نتیجه ذرات با اندازه مش ۵۰-۴۰ بیشترین ظرفیت را در جذب آب دارند.

تأثیر دما بر ظرفیت تورم

هنگامی‌که ژل پیش ساخته به مخزن hk تزریق می‌شود در دمای بیشتری نسبت به سطح زمین قرار می‌گیرد. به‌منظور بررسی این عامل مهم، ظرفیت تورم ژل پیش ساخته با اندازه مش ۱۲۰-۱۰۰ در آب دریا در دمای ۸۰ °C اندازه‌گیری و نتایج آن با دمای ۲۰ °C مقایسه شد. نتایج این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش دما تعداد بیشتری از گروه‌های عاملی آبدوست روی زنجیرهای پلیمری ایجاد می‌شود [۱۶] و به‌عبارتی شبکه سه بعدی ژل پیش ساخته منبسط می‌شود، در نتیجه آب بیشتری به درون حفرات ژل نفوذ می‌کند به‌طوری‌که نسبت تورم آن از ۱۳/۵ به ۱۶/۵ افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۵ تأثیر اندازه ذرات ژل پیش ساخته بر ظرفیت تورم آنها در حضور شوراب‌های مختلف



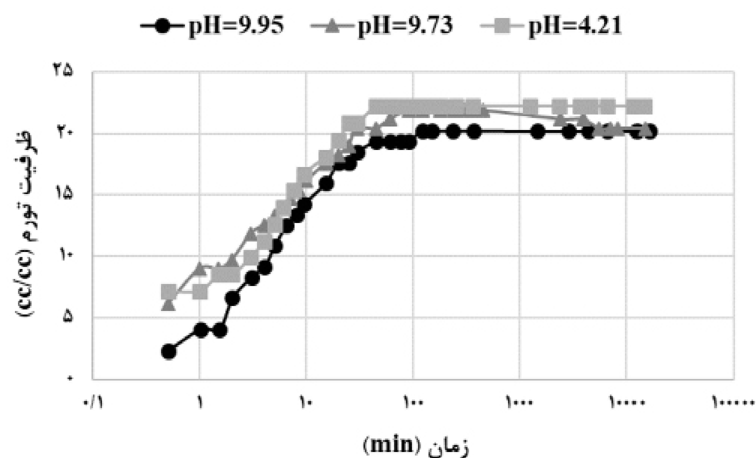
شکل ۶ تأثیر دما بر ظرفیت تورم ژل پیش ساخته

تأثیر pH بر ظرفیت تورم

پس از تزریق ژل پیش ساخته به مخزن، ژل در pH متفاوتی نسبت به سیال اولیه که در آن متورم شده است قرار می‌گیرد. برای بررسی تأثیر این عامل، با افزودن بافر اسیدی (pH=۴) و بافر بازی (pH=۱۰) به آب دریا، ظرفیت تورم ژل پیش ساخته با مش ۵۰-۴۰ در محیط‌های اسیدی و بازی اندازه‌گیری شد. شکل ۷ نسبت تورم ژل پیش ساخته را در سه نمونه آب دریا با pH مختلف نشان می‌دهد. توجه شود که آب دریای ساخته شده در آزمایشگاه دارای خاصیت بازی (pH=۹/۷۳) است. بر طبق نتایج، کاهش pH موجب افزایش نسبت تورم ژل می‌شود چراکه تعداد گروه‌های عاملی آبدوست در زنجیره‌های پلیمری افزایش می‌یابد و از این رو میزان جذب مولکول‌های آب نیز افزایش می‌یابد [۱۶]. با این وجود حساسیت ظرفیت تورم این نوع از ژل سنتز شده نسبت به pH بسیار کم است که بیانگر پایداری مناسب آن در محیط‌های اسیدی و بازی است.

تأثیر اجزای نفتی قابل حل در آب بر ظرفیت تورم

در مخازن نفتی آب سازندی و نفت به‌مدت بسیار طولانی در تماس با هم قرار می‌گیرند و به همین دلیل آب سازندی حاوی اجزاء نفتی قابل حل (WSF) است که می‌تواند بر عملکرد ژل پیش ساخته تأثیر بگذارد. آب سازندی حاوی ترکیبات نفتی قابل حل بر طبق روش اندرسون و همکاران [۳۰] در آزمایشگاه تهیه و استفاده شده است.



شکل ۷ تأثیر pH بر ظرفیت تورم ژل پیش ساخته

شکل ۸ ظرفیت تورم ژل پیش ساخته با مش ۵۰-۴۰ را در حضور آب سازندی و آب سازندی حاوی ترکیبات نفتی قابل حل نشان می‌دهد. بر طبق نتایج، حضور اجزا نفتی قابل حل در آب سازندی موجب افزایش ظرفیت تورم از مقدار ۱۴ به ۲۰ شده است. در واقع ترکیبات آب دوست موجود در اجزاء نفتی مانند گروه‌های نفتنیک اسید و کربوکسیلیک اسید می‌توانند به درون ساختار پلیمری ژل پیش ساخته نفوذ کرده و در نتیجه قابلیت جذب آب بیشتری به آن بدهند.

پایداری ژل پیش ساخته متورم شده

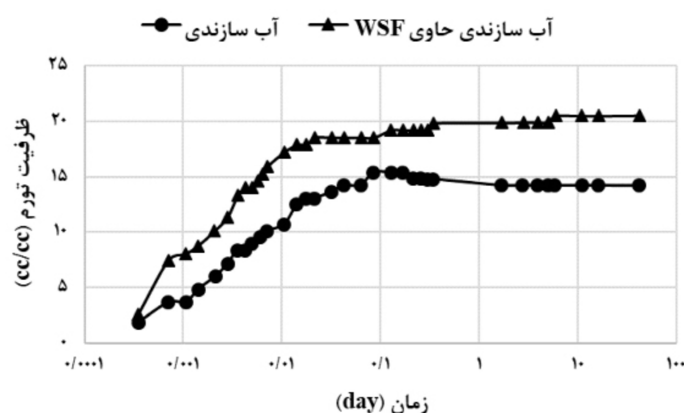
پایداری ژل متورم شده در برابر تغییر شوری

یکی از شرایط ممکن در تزریق ذرات ژل پیش ساخته به مخزن، افزایش شوری محیط است که می‌تواند سبب کاهش نسبت تورم ذرات ژل شده و بر عملکرد آنها تأثیر منفی بگذارد، بنابراین ذرات ژل بایستی که در برابر افزایش شوری محیط پایداری مناسبی داشته باشند. در این آزمایش، ابتدا ذرات ژل پیش ساخته به‌مدت ۱۰ روز در آب دریا ۱۰۰بار رقیق شده قرار می‌گیرد تا به تورم کامل برسد. سپس محلول آبی چندین بار با آب دریا جابه‌جا می‌شود و نسبت تورم آن اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۹ میزان کاهش ظرفیت تورم ژل پیش ساخته را در اثر تغییر شوری نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش ۱۰۰ برابری شوری، ظرفیت تورم ژل پس از گذشت ۳۵ روز به مقدار ۸۴٪ ظرفیت تورم اولیه خود می‌رسد. به‌عبارت دیگر با افزایش ۱۰۰ برابری شوری محیط، ذرات ژل تنها ۱۶٪ از آب جذب شده درون شبکه‌ای خود را از دست می‌دهد. پایداری ژل در برابر افزایش شوری را می‌توان به حضور نانوذرات سیلیکا در ساختار ژل نسبت داد. در واقع حضور تنها ۰/۸٪ وزنی از نانوسیلیکا سبب افزایش سطح مؤثر زنجیرهای پلیمری برای جذب مولکول‌های آب شده و از این رو مقدار آب پیوندی در ساختار ژل نسبت به مقدار آب آزاد در حفرات شبکه سه بعدی ژل افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش شوری محیط، ژل‌ها آب پیوندی جذب شده خود را به‌خوبی حفظ کرده و پایداری بالایی از خود نشان می‌دهند.

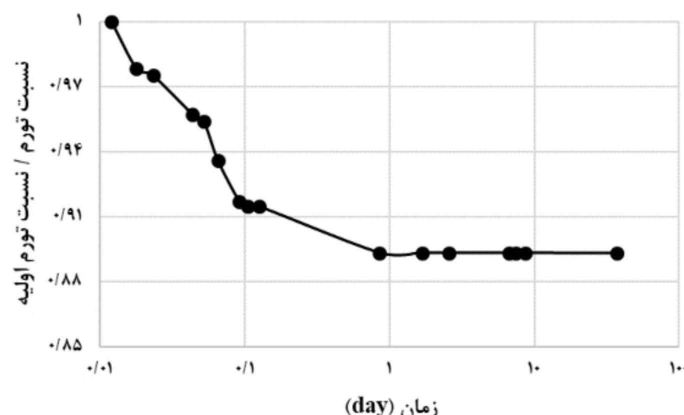
پایداری ژل متورم شده در حضور کربن دی اکسید

در مخازنی که گاز کربن دی اکسید به آنها تزریق می‌شود، ذرات ژل تزریق شده به مخزن در تماس با گاز کربن دی اکسید می‌توانند آب جذب شده خود را از دست بدهند. جهت بررسی پایداری ژل پیش ساخته در حضور گاز کربن دی اکسید، ابتدا دو نمونه ژل ذره‌ای پیش ساخته با اندازه مش ۳۰-۲۰ و ۱۲۰-۱۰۰ در آب دریا و آب دریا ۱۰۰ بار رقیق شده به تورم کامل می‌رسند.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۲۳-۳



شکل ۸ تأثیر اجزای نفتی قابل حل در آب بر ظرفیت تورم ژل پیش ساخته

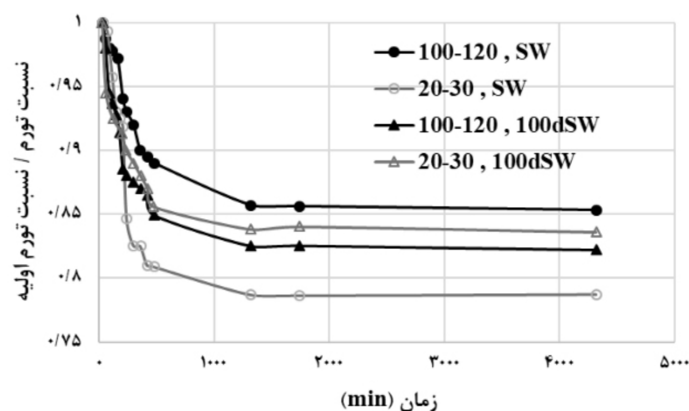


شکل ۹ پایداری ژل پیش ساخته متورم شده در اثر افزایش شوری محیط

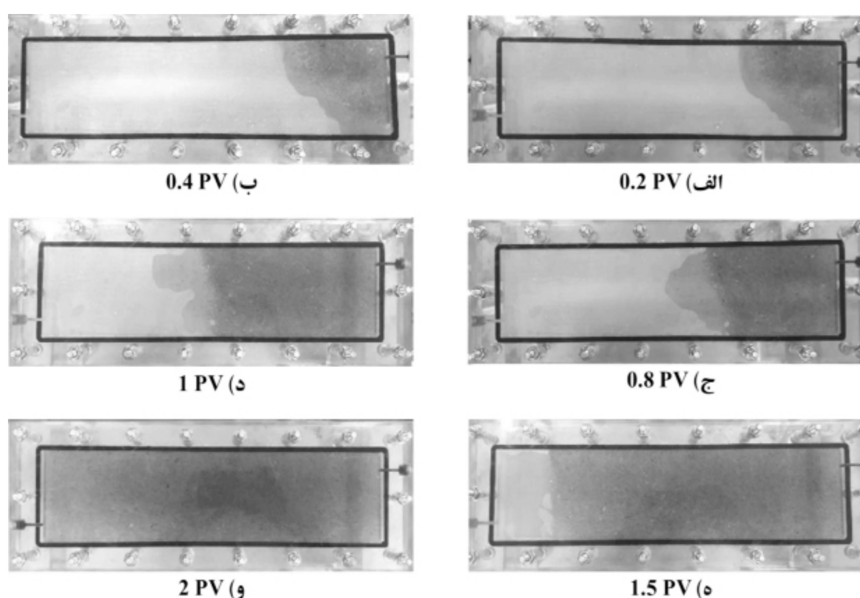
سپس این نمونه‌ها در معرض گاز کربن دی اکسید قرار می‌گیرند تا میزان نگهداشت آب آنها بررسی شود. نتایج این آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ژل پیش ساخته با اندازه مش ۱۲۰-۱۰۰ و متورم شده در آب دریا پس از 71 h مجاورت با کربن دی اکسید، تنها ۱۵٪ از آب اولیه خود را از دست می‌دهد که دارای بیشترین پایداری است. کاهش شوری برای این اندازه مش سبب کاهش پایداری آن می‌شود. از طرفی ژل پیش ساخته با اندازه مش بزرگتر (۳۰-۲۰) و متورم شده در آب دریا پس از مجاورت با کربن دی اکسید، ۲۲٪ از آب اولیه خود را از دست می‌دهد که دارای کمترین پایداری است. کاهش شوری برای این اندازه از ذرات موجب افزایش پایداری آن شده است. به‌عنوان نتیجه گیری کلی ذرات ژل پیش ساخته پایداری بسیار خوبی را در برابر گاز کربن دی اکسید از خود نشان دادند. علت این امر به نانوذرات سیلیکا وابسته است که موجب افزایش آب پیوندی در ساختار سه بعدی ژل شده و این آب پیوندی توسط نیروی جاذبه الکتروستاتیکی بسیار قوی در ساختار ژل مستقر شده است. همچنین نانوذرات با پوشاندن سطح حفرات در ساختار ژل، سبب کاهش دسترسی گاز کربن دی اکسید به آب پیوندی و حتی آب آزاد می‌شوند.

آزمایشات هل ساو سل

ابتدا جهت بررسی توانایی ژل پیش ساخته در انسداد شکاف، نتایج آزمایش شماره ۴ مطابق جدول ۲ به‌عنوان آزمایش پایه بررسی می‌شوند. شکل ۱۱ نحوه حرکت ذرات ژل پیش ساخته را در شکاف در طول زمان (برحسب حجم تزریقی) نشان می‌دهد.

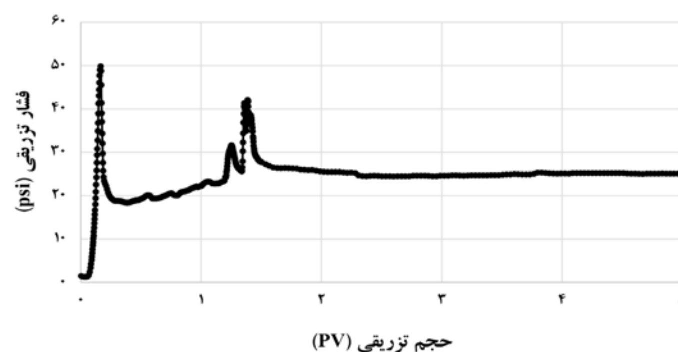


شکل ۱۰ پایداری ژل پیش ساخته متورم شده در حضور طولانی مدت کربن دی اکسید



شکل ۱۱ نحوه حرکت ذرات ژل پیش ساخته با اندازه مش ۲۰-۱۸ در مدل شکاف برای آزمایش ۴ (تزریق از سمت راست و تولید از سمت چپ صورت می‌گیرد)

برای مشاهده بهتر ذرات ژل از رنگ شیمیایی آبی در مرحله سنتز ژل استفاده شده است. در ابتدا که غلظت ذرات ژل پیش ساخته در سیال تزریقی پایین است حرکت توده ژل بیشتر شبیه به حرکت مایعات است (شکل ۱۱ قسمت الف و ب و ج). با ادامه تزریق و افزایش غلظت ذرات ژل پیش ساخته، توده ذرات به‌صورت پیستونی در شکاف جابه‌جا می‌شوند (شکل ۱۱ قسمت د و هـ). بنابراین رفتار پیشروی ذرات ژل ابتدا مانند سیالات ویسکوز است و سپس رفتار شبه پلاستیک را از خود نشان می‌دهد. ذرات ژل در حین انتشار در شکاف مقداری از آب خود را از دست می‌دهند و به همین علت ژل‌ها پس از ۲ PV حجم تزریقی به انتهای شکاف می‌رسند. آب خارج شده از ژل‌ها در حین حرکت ذرات در شکاف، اندکی جلوتر از جبهه ژل در شکاف حرکت می‌کند که در شکل ۱۱ قسمت الف، ب، ج و د قابل مشاهده است. پس از قرارگیری ژل در شکاف، آب دریا با دبی ۱ cc/min به درون شکاف تزریق می‌شود که رفتار فشار تزریقی آن در شکل ۱۲ آمده است. بر طبق نتایج، با تزریق آب دریا فشار تزریقی ابتدا به مقداری بیشینه افزایش و سپس سریعا کاهش یافته و در مقدار مشخصی ثابت می‌شود.

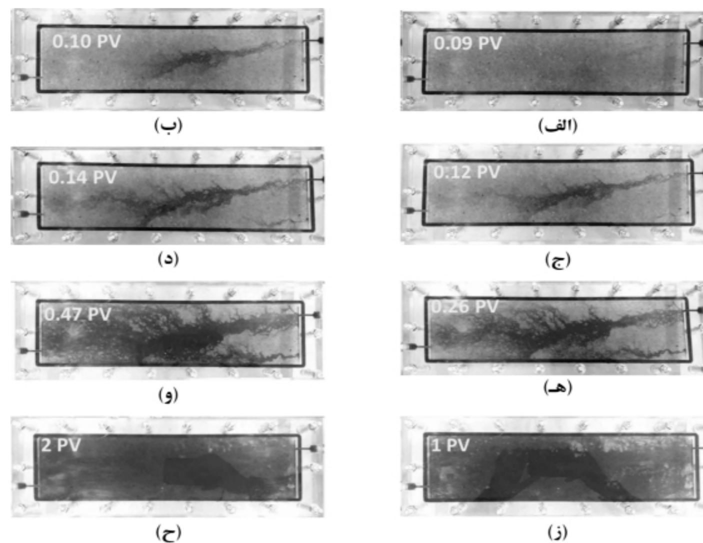


شکل ۱۲ رفتار فشار تزریقی آب دریا در شکاف پر شده توسط ذرات ژل با اندازه مش ۲۰-۱۸ برای آزمایش ۴

در واقع تعدادی از ذرات ژل پیش ساخته در بیشینه فشار تزریقی که به فشار میان‌شکافت معروف است، از شکاف خارج می‌شوند. وجود دو فشار بیشینه در این شکل به این معناست که با ادامه تزریق آب دریا، تعدادی از ذرات ژل پیش ساخته در قسمت‌های دیگر شکاف به‌سمت خروجی شکاف حرکت کرده و با انسداد آن باعث ایجاد قله فشاری ثانویه می‌شوند. فشار تزریقی پایدار شده که بیانگر مقاومت نهایی ژل‌ها در برابر جریان آب است، برای محاسبه ضریب مقاومت باقی‌مانده و تراوایی شبکه ژل استفاده می‌شود. برای مشاهده نحوه حرکت آب ثانویه در شبکه متخلخل ذرات ژل، چند قطره رنگ قرمز به آب دریا اضافه می‌شود که نتایج آن در شکل ۱۳ آمده است. بر طبق مشاهدات با ایجاد مقاومت در برابر جریان آب توسط ذرات ژل، آب دریا مجبور است مسیرهای کرمچاله مانندی را در شبکه ذرات ژل ایجاد کند، به‌طوری که پس از تزریق ۱ حجم حفره آب دریا تقریبا تمامی شبکه ذرات ژل توسط آب دریا مورد هجوم قرار می‌گیرند. در آزمایشات هل-شاو سل عملکرد ذرات ژل پیش ساخته در انسداد شکاف و تأثیر پارامترهای مختلف بر آن بررسی می‌شود. از این رو به‌کمک نمودار فشار تزریقی بر حسب زمان فشار میان‌شکافت، فشار تزریقی پایدار شده، ضریب مقاومت باقی‌مانده و تراوایی شبکه ژل محاسبه می‌شوند که نتایج آنها در جدول ۳ آمده است.

تأثیر دبی تزریقی بر عملکرد انسدادی ژل پیش ساخته

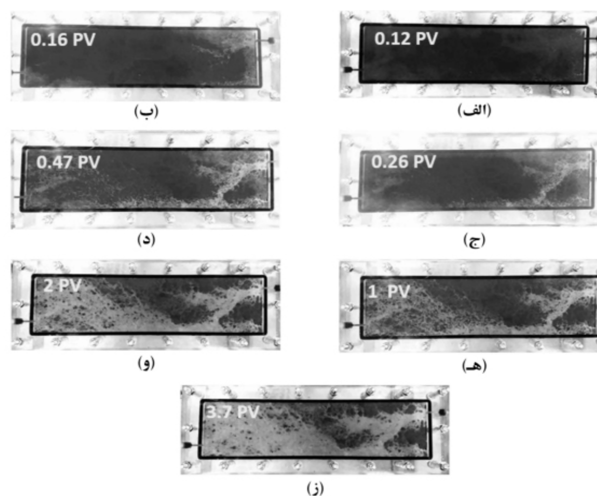
پس از قرارگیری ژل پیش ساخته در شکاف، آب ثانویه به ترتیب با دبی ۱، ۲، ۴ و ۸ cc/min به شکاف تزریق می‌شود. بر طبق نتایج آزمایش ۴ در جدول ۳، با افزایش دبی تا مقدار ۴ cc/min، فشار میان‌شکافت و فشار پایدار شده کاهش می‌یابند، زیرا با افزایش دبی مقدار ژل خروجی از شکاف افزایش یافته و مسیرهای بزرگتری برای حرکت آب در شبکه ژل شکل می‌گیرد، بنابراین ضریب مقاومت باقی‌مانده کاهش و تراوایی شبکه ژل افزایش می‌یابد. اما با ادامه افزایش دبی تزریقی به ۸ cc/min، فشار میان‌شکافت و فشار تزریقی پایدار شده افزایش می‌یابند. در واقع در این مرحله تعداد و اندازه مسیرهای شکل گرفته در شبکه ژل به بیشینه خود رسیده است و افزایش بیشتر دبی تزریقی بر طبق رابطه دارسی منجر به افزایش فشار تزریقی می‌شود، بنابراین ضریب مقاومت باقی‌مانده نیز افزایش می‌یابد. جهت بررسی تأثیر دبی تزریقی آب ثانویه بر نحوه حرکت آن در شکاف پر شده با ذرات ژل، نتایج شکل ۱۳ و شکل ۱۴ با هم مقایسه می‌شوند. شکل ۱۳ نحوه حرکت آب دریا (سیاه رنگ) با دبی ۱ cc/min در شکاف پر شده توسط ذرات ژل (خاکستری رنگ) و شکل ۱۴ نحوه حرکت آب دریا (خاکستری رنگ) با دبی ۲ cc/min در شکاف پر شده توسط ذرات ژل (سیاه رنگ) را برای آزمایش ۴ نشان می‌دهد.



شـــکل ۱۳ نحـوه حرکـت آب دریـا (سـیاه رنـگ) بـا دبـی cc/min ۱ درون شـکاف پـر شـده توسـط ذرات ژل (خاکسـتری رنـگ) بـا انـدازه مـش ۲۰-۱۸ بـرای آزمایـش ۴

جدول ۳ نتایج آزمایشات بررسی عملکرد ژل پیش ساخته در انسداد شکاف

شماره آزمایش	دبی آب تزریقی ثانویه (cc/min)	فشار میان‌شکافت (psi)	فشار پایدار شده (psi)	زمان میان‌شکافت (حجم حفره)	ضریب مقاومت باقی‌مانده	تراوایی شبکه ژل (mD)
۱	۱	۳۲/۵	۱۱/۹	۰/۰۸	۱۲۴	۴۲۹
۲	۱	۲۷/۲	۱۰/۲	۰/۲۸	۱۰۶	۵۰۰
۳	۱	۳۴/۴	۱۲/۶	۰/۰۲	۱۳۰	۴۰۶
۴	۱	۴۹/۷	۲۵/۱	۰/۱۶	۲۴۹	۲۰۷
	۲	۳۸/۷	۱۷/۵	۰/۱۹	۱۱۰	۵۹۳
	۴	۲۲/۳	۱۰/۸	۰/۱۳	۵۶	۱۳۲۱
	۸	۲۴/۹	۱۵/۶	۰/۲۲	۶۶	۳۸۲۰
۵	۱	۳۳/۱	۲۰/۷	۰/۵۴	۲۰۷	۲۵۰
۶	۱	۶/۹	۶/۶	۰/۰۴	۶۶	۷۹۰



شـــکل ۱۴ نحـوه حرکـت آب دریـا (خاکسـتری رنـگ) بـا دبـی cc/min ۲ درون شـکاف پـر شـده توسـط ذرات ژل (سـیاه رنـگ) بـا انـدازه مـش ۲۰-۱۸ بـرای آزمایـش ۴

بر طبق نتایج جدول ۳، با افزایش دبی تزریقی آب دریا از 1 cc/min به 2 cc/min، مقاومت شبکه ژل در برابر آب تزریقی ثانویه کاهش می‌یابد. بنابراین تعداد و اندازه کرمچاله‌های شکل گرفته در شبکه ژل در حین تزریق آب دریا با دبی 2 cc/min کمتر از تعداد کرمچاله‌های شکل گرفته در شبکه شکاف در حین تزریق آب دریا با دبی 1 cc/min است. در واقع تزریق آب دریا با دبی 1 cc/min برای عبور از شبکه ژل، به ناچار کرمچاله‌های بیشتری در میان آن ایجاد می‌کند.

تأثیر اندازه ذرات بر عملکرد انسدادی ژل پیش ساخته

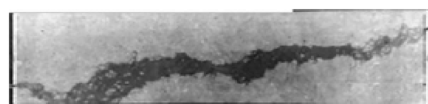
به‌منظور بررسی تأثیر اندازه ذرات بر عملکرد انسدادی ژل، نتایج آزمایشات ۱، ۴، ۵ و ۶ در جدول ۳ با هم مقایسه می‌شوند. افزایش اندازه ذرات از مش ۵۰-۴۰ تا مش ۲۰-۱۸ سبب افزایش فشار میان‌شکافت و همچنین فشار پایدار می‌شود، زیرا ذرات بزرگ‌تر انسداد بیشتری در شکاف ایجاد می‌کنند و از این رو موجب افزایش ضریب مقاومت باقی‌مانده و کاهش تراوایی شبکه ژل می‌شوند. اما با افزایش بیشتر اندازه ذرات به مش ۱۶-۱۲، گرادیان فشار میان‌شکافت و فشار پایدار کاهش می‌یابد. در واقع این ذرات که نسبت انطباق آنها برابر ۲/۹ است بازدهی انسداد کمتری ایجاد می‌کنند، به‌طوری‌که ضریب مقاومت باقی‌مانده کاهش و تراوایی شبکه ژل افزایش می‌یابد. بنابراین نسبت انطباق ۲/۹ برابر نسبت انطباق بحرانی[1] است که وَنگ و همکاران و ژائو و بای نیز در کارهای خود به نسبت انطباق بحرانی ۳ رسیده‌اند [۳۱ و ۳۲]. به‌نظر می‌رسد که شکسته شدن ذرات در نسبت انطباق خاصی اتفاق می‌افتد که مستقل از خواص ژل و شرایط عملیاتی است چراکه نوع ژل مورد استفاده و شرایط تزریقی در این کار کاملا متفاوت با کارهای قبلی است.

شکل ۱۵ نحوه حرکت آب دریا با دبی 1 cc/min در شکاف پر شده توسط ذرات ژل با دو اندازه مش ۲۰-۱۸ و اندازه مش ۱۶-۱۲ را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج بدلیل بیشتر بودن مقاومت ذرات ژل با اندازه مش ۱۸-۲۰، آب تزریقی برای عبور از شبکه ژل به ناچار کرمچاله‌های بیشتری در میان آن تشکیل می‌دهد. از طرفی وقتی که آب دریا به درون شبکه ژل با اندازه مش ۱۶-۱۲ تزریق می‌شود با ایجاد مسیر کوچک‌تر به‌صورت یک کانال به‌سمت خروجی جریان می‌یابد. این کانال ایجاد شده کمترین مقاومت را در برابر جریان آب دارد و بنابراین آب تزریق شده به سایر قسمت‌های شبکه ژل کمتر نفوذ می‌کند.

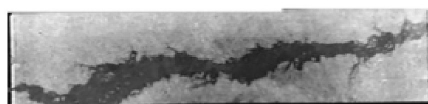
تأثیر شوری بر عملکرد انسدادی ژل پیش ساخته

جهت بررسی تأثیر شوری بر عملکرد انسداد ذرات ژل پیش ساخته در شکاف، دو سناریوی مختلف توسط آزمایشات ۲ و ۳ آزموده می‌شود.


الف) ۰/۲۶ PV


ج) ۰/۲۶ PV


ب) ۰/۴۷ PV


د) ۰/۴۷ PV

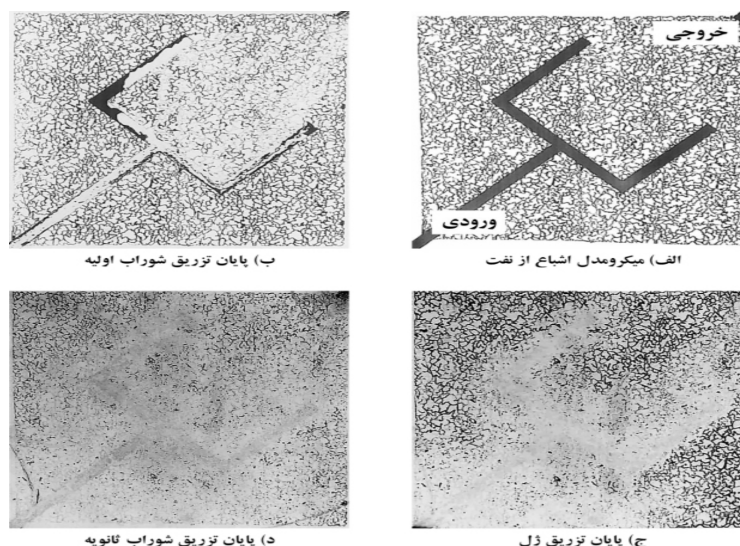
شکل ۱۵ تاثیر اندازه ذرات بر نحوه حرکت آب دریا (سیاه رنگ) با دبی 1 cc/min در شکاف پرشده توسط ذرات ژل (خاکستری رنگ). الف و ب) ذرات با اندازه مش ۱۸-۲۰. ج و د) ذرات با اندازه مش ۱۲-۱۶

1. Critical Matching Size Ratio

بر طبق نتایج آزمایش ۲ در جدول ۳ ذرات ژل متورم شده در آب دریا به‌علت قدرت ژله‌ای بیشتر نسبت به ذرات ژل متورم شده در آب دریا ۱۰۰ بار رقیق شده، فشار میان‌شکافت و فشار پایدار بیشتری ایجاد کرده‌اند. بنابراین افزایش شوری آب ژل‌ها موجب افزایش ضریب مقاومت باقی‌مانده و کاهش تراوایی شبکه ژل می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش ۳ در جدول ۳، کاهش شوری آب تزریقی ثانویه موجب افزایش فشار میان‌شکافت و همچنین فشار حالت پایدار می‌شود. در واقع تزریق آب دریا ۱۰۰بار رقیق شده پس از جایگیری ذرات ژل متورم شده در آب دریا، موجب افزایش نسبت تورم ذرات ژل می‌شود و در نتیجه انسداد شکاف بهبود پیدا می‌کند. از این رو کاهش شوری آب تزریقی ثانویه سبب افزایش ضریب مقاومت باقی‌مانده و کاهش تراوایی شبکه ژل می‌شود.

آزمایش میکرومدل

هدف از انجام این آزمایش بررسی عملکرد ژل پیش ساخته سنتز شده در کاهش تولید آب و افزایش تولید نفت در سیستم میکرومدل ناهمگن شکاف‌دار است. شکل ۱۶ مراحل مختلف سناریوی تزریقی را در میکرومدل شکاف‌دار نشان می‌دهد. در این شکل رنگ سیاه نشان‌دهنده نفت، نواحی سفید رنگ نشان دهنده آب تزریقی و نواحی خاکستری رنگ نشان دهنده ذرات ژل پیش ساخته هستند. برای محاسبه ضریب بازیافت نفت ماتریس در هر مرحله از سناریوی تزریقی، تصاویر میکرومدل توسط نرم‌افزار ImageJ آنالیز شده و درصد اشباع نفت (نواحی سیاه رنگ) به‌کمک روش مساحت سنجی محاسبه می‌شود. شکل ۱۶ قسمت الف حالت اشباع اولیه میکرومدل از نفت را نشان می‌دهد. در این مدل تزریق از سمت چپ-پایین و تولید از سمت راست-بالا انجام می‌شود. شکل ۱۶ قسمت ب مقدار نفت باقی‌مانده را در پایان سیلاب زنی اولیه با آب کم‌شور (۱۰۰ dsw) نشان می‌دهد. در این مرحله سیال تزریقی ابتدا از طریق شکاف حرکت می‌کند زیرا افت فشار مسیر شکاف نسبت به ماتریس بسیار پایین بوده و مقاومت آن در برابر جریان آب تزریقی کمتر است. در ادامه سیال تزریقی تنها مقدار کمی از نفت ماتریس را بین دو شاخه شکاف جابه‌جا می‌کند به‌طوری‌که ضریب بازیافت نفت ماتریس پس از تزریق ۴ حجم حفره آب کم‌شور برابر ۲۹٪ به‌دست می‌آید.



شکل ۱۶ مراحل مختلف سناریوی تزریقی در میکرومدل شکاف‌دار: الف) حالت اشباع اولیه از نفت (سیاه رنگ)، ب) پس از PV ۴ تزریق 100xdSW اولیه، ج) پس از تزریق ذرات ژل پیش ساخته (قسمت‌های خاکستری رنگ در شکاف) و د) پس از PV ۴ تزریق 100xdSW ثانویه

به‌منظــور کاهــش جریــان آب تزریقــی در شــکاف و افزایـش ضریـب بازیافـت نفـت ماتریـس، ذرات ژل پیـش ساخته بـا انـدازه مـش ۵۰-۴۰ و کامـلاً متـورم شـده در آب دریـا، بـه میکرومـدل تزریـق شـد کـه نتیجـه آن در شـکل ۱۶ قسـمت ج نشـان داده شـده اسـت. بـر طبـق نتایـج، ذرات ژل در حیـن تزریـق بخـش زیـادی از آب جـذب شـده خـود را از دسـت می‌دهنـد کـه ایـن آب بـا نفـوذ بـه نواحـی دوردسـت ماتریـس و جـاروب کـردن نفـت سـبب افزایـش ضریـب بازیافـت ماتریـس می‌شـود. همچنیـن مقـداری از ذرات ژل در اثـر شکسـته شـدن یـا تغییـر شـکل دادن بـه درون ماتریـس نزدیـک شـکاف نفـوذ می‌کننـد کـه برهم‌کنـش بیـن شـکاف و ماتریـس را کامـلا مسـدود می‌سـازند. بنابرایـن در مرحلـه تزریـق ذرات ژل پیـش سـاخته بـه محیـط متخلخـل، ابتـدا آب ژل، سـپس مخلوطـی از ذرات ژل و آب، و نهایتـا ذرات ژل بـه درون محیـط متخلخـل نفـوذ می‌کننـد. در ایـن مرحلـه مقـدار قابـل توجهـی از نفـت ماتریـس جابه‌جـا شـده اسـت به‌طوری‌کـه ضریـب بازیافـت نفـت ماتریـس بـه مقـدار ۵۶٪ می‌رسـد. پـس از جایگیـری ژل در شـکاف، بـرای بررسـی عملکـرد آن در انسـداد شـکاف، آب کـم شـور ثانویـه بـه میکرومـدل تزریـق شـد کـه نتایج آن در شـکل ۱۶ قسـمت د نشـان داده شـده اسـت. بـر طبـق نتایـج، آب تزریقـی ثانویـه کامـلا به‌سـمت ماتریـس منحـرف می‌شـود زیـرا شـکاف توسـط ذرات ژل مسـدود شـده اسـت و تراوایـی آن شـدیدا کاهـش یافتـه اسـت. همچنیـن برهم‌کنـش بیـن شـکاف و ماتریـس توسـط ذرات ژل نفـوذ کـرده بـه ماتریـس کامـلا مسـدود شـده اسـت کـه اجـازه ورود آب بـه شـکاف را نمی‌دهـد. بنابرایـن تزریـق آب ثانویـه سـبب افزایـش بازدهـی جـاروب ماتریـس شـده به‌طوری‌کـه ضریـب بازیافـت نفـت از ماتریـس بـه مقـدار ۹۴٪ می‌رسـد. به‌عنـوان نتیجه‌گیـری کلـی تزریـق ذرات ژل پیـش سـاخته بـه میکرومـدل ناهمگـن باعـث افزایـش ضریـب بازیافـت نفـت از ۲۹٪ در سـیلاب اولیـه بـه ۹۴٪ در سـیلاب ثانویـه می‌شـود.

نتیجه‌گیری

در ایـن پژوهـش ذرات ژل پیـش سـاخته بـه‌روش پلیمریزاسـیون رادیـکال آزاد و بـدون اسـتفاده از کاتالیزگر سـنتز شـده اسـت کـه عملکـرد آن در عملیـات کنتـرل یکنواختـی جبهـه توسـط آزمایشـات مختلفـی ارزیابـی شـده اسـت. برخـی از نـکات به‌دسـت آمـده از ایـن پژوهـش در ادامـه آمـده اسـت.

• ظرفیـت تـورم ژل پارامتـر مهمـی در تعییـن موفقیـت یـک عملیـات درمـان بـا ژل اسـت. ژل پیـش سـاخته‌ای کـه بـه مخـزن تزریـق می‌شـود در محیـط مختلفـی قـرار می‌گیـرد. در ایـن پژوهـش تأثیـر شـوری، دمـا، pH، انـدازه ذرات ژل و ترکیبـات نفتـی قابـل حـل بـر ظرفیـت تـورم نمونـه ژل سـنتز شـده بررسـی شـدند.

• انتخـاب انـدازه ذرات بهینـه در طراحـی عملیـات تزریـق ژل امـر مهمـی اسـت. نسـبت تـورم ذرات ژل پیـش سـاخته حاضـر در انـدازه مـش ۵۰-۴۰ بـه بیشـترین مقـدار خـود می‌رسـد.

• حضـور ترکیبـات نفتـی آبدوسـت ماننـد کربوکسـیلیک اسـیدها و نفتنیـک اسـیدها کـه در آب سـازندی قابـل حـل هسـتند می‌توانـد بـر ظرفیـت تـورم ژل مؤثـر باشـد. بـر طبـق نتایـج ذرات ژل پیـش سـاخته در آب حـاوی اجـزاء نفتـی قابـل حـل ظرفیـت تـورم بالاتـری دارنـد.

• ذرات ژل پیـش سـاخته پـس از تزریـق شـدن بـه مخزن بایسـتی بتواننـد پایـداری مناسـبی در برابـر افزایـش شـوری و دمـا، کاهـش pH و یـا حضـور گاز کربـن دی اکسـید داشـته باشـند. ژل سـنتز شـده در ایـن پژوهـش در اثـر افزایـش ۱۰۰برابـری شـوری محیـط، تنهـا ۱۶٪ از آب خـود را از دسـت می‌دهـد و در حضـور کربـن دی اکسـید ۱۵٪ تـا ۲۲٪ از آب خـود را از دسـت می‌دهـد کـه بـرای بیانگـر پایـداری مناسـب آن اسـت. همچنیـن حساسـیت ظرفیـت تـورم ایـن نمونـه ژل بـه تغییـرات pH و دمـا کـم اسـت.

• آزمایشـات دینامیـک هل-شـاو سـل نشـان می‌دهـد کـه ذرات ژل شـکاف را کامـلاً مسـدود نمی‌کننـد بلکـه در طـول شـکاف یـک محیـط متخلخـل جدیـدی راایجـاد می‌کننـد.

تراوایی این شبکه ژل به دبی آب تزریقی ثانویه، شوری و اندازه ذرات ژل وابسته است.

• افزایش دبی تزریقی آب ثانویه منجر به جاروب شدن بخش‌های بزرگتری از شبکه ژل جای گرفته در شکاف می‌شود و از این رو بازدهی انسداد را کاهش می‌دهد. بنابراین در عملیات درمان با ژل بهتر است سیلاب‌زنی ثانویه با کمترین دبی تزریقی ممکن انجام شود.

• تزریق ذرات ژل بزرگتر انسداد بهتری را در شکاف ایجاد می‌کند، اما تازمانی‌که در حین تزریق به شکاف به ذرات کوچکتر شکسته نشوند. نسبت انطباق بحرانی برای این نمونه از ذرات ژل برابر ۲/۹ به‌دست آمده است که با توجه به نزدیکی آن با نتایج سایر پژوهش‌ها، به نظر می‌رسد این نسبت مستقل از خواص ژل و شرایط تزریق است.

• ذرات ژل متورم شده در آب شورتر به‌علت قدرت ژله‌ای بیشتر، بازدهی انسداد بالاتری در شکاف دارند. از طرفی تزریق آب ثانویه با شوری کمتر به‌علت افزایش نسبت تورم ذرات، موجب افزایش بازدهی انسداد شکاف می‌شود. بنابراین در تزریق آب کم‌شور ثانویه بایستی به محدودیت کاهش قدرت ژله‌ای ژل‌ها توجه داشت.

• تزریق ذرات ژل پیش ساخته به میکرومدل ناهمگن باعث افزایش ضریب بازیافت نفت ماتریس از مقدار ۲۹٪ در مرحله سیلاب زنی اولیه به مقدار ۹۴٪ در مرحله سیلاب زنی ثانویه شد. در مرحله تزریق ژل به میکرومدل شکاف‌دار، نفوذ ژل و آب آن به ماتریس موجب افزایش برداشت نفت می‌شود.

علائم و نشانه‌ها

HPAM: پلی اکریل آمید هیدرولیز شده

PV: حجم حفره

TEMED: تترا متیل اتیلن دی آمین

Frr: ضریب مقاومت باقی‌مانده

SR: نسبت تورم

Rp: نسبت انطباق

Vs: حجم ژل متورم شده

WSF: اجزای نفتی قابل حل

Vd: حجم ژل خشک

مراجع

[1]. Bai, B., Huang, F., Liu, Y., Seright, R. S., & Wang, Y. (2008). Case study on preformed particle gel for in-depth fluid diversion, In SPE Symposium on Improved Oil Recovery, Doi: https://doi.org/10.2118/113997-MS.
[2]. Bai, B., Wei, M., & Liu, Y. (2013). Field and lab experience with a successful preformed particle gel conformance control technology, In SPE Production and Operations Symposium, Doi: https://doi.org/10.2118/164511-MS.
[3]. Seright, R. S. (2003). Washout of Cr (III)-acetate-HPAM gels from fractures, In International Symposium on Oilfield Chemistry, Doi: https://doi.org/10.2118/80200-MS .
[4]. Wang, D., Zhao, L., Cheng, J., & Wu, J. (2003). Actual field data show that production costs of polymer flooding can be lower than water flooding, In SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific, Doi: https://doi.org/10.2118/84849-MS.
[5]. Bai, B., Li, Y., & Liu, X. (1999). New development of water shutoff and profile control in oilfields in China, Oil Drilling & Production Technology, 20(3): 64-68.
[6]. Sydansk, R. D., & Romero-Zerón, L. (2011). Reservoir conformance improvement, 138, Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.012.
[7]. Sydansk, R. D., & Seright, R. S. (2007). When and where relative permeability modification water-shut-off treatments can be successfully applied, SPE Production & Operations, 22(02): 236-247. Doi: https://doi.org/10.2118/99371-MS.
[8]. Seright, R. S. (1995). Gel placement in fractured systems, SPE Production & Facilities, 10(04): 241-248. Doi: https://doi.org/10.2118/27740-PA
[9]. Seright, R. S., & Lee, R. L. (1999). Gel treatments for reducing channeling in naturally fractured reservoirs, SPE Production & Facilities, 14(04): 269-276. Doi: https://doi.org/10.2118/59095-PA
[10]. Needham, R. B., Threlkeld, C. B., & Gall, J. W. (1974, April). Control of water mobility using polymers and

multivalent cations, In SPE Improved Oil Recovery Symposium, Doi: https://doi.org/10.2118/4747-MS.
[11]. Al-Assi, A. A., Willhite, G. P., Green, D. W., & McCool, C. S. (2009). Formation and propagation of gel aggregates using partially hydrolyzed polyacrylamide and aluminum citrate, SPE Journal, 14(03): 450-461. Doi: https://doi.org/10.2118/100049-PA.
[12]. Eoff, R. L., Irimia, A., Egli, M., & Guengerich, F. P. (2007). Sulfolobus solfataricus DNA polymerase Dpo4 is partially inhibited by “wobble” pairing between O6-methylguanine and cytosine, but accurate bypass is preferred, Journal of Biological Chemistry, 282(2): 1456-1467, Doi: https://doi.org/10.1074/jbc.M609661200.
[13]. Chauveteau, G., Omari, A., Tabary, R., Renard, M., Veerapen, J., & Rose, J. (2001). New size-controlled microgels for oil production, In SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Doi: https://doi.org/10.2118/64988-MS.
[14]. Coste, J. P., Liu, Y., Bai, B., Li, Y., Shen, P., Wang, Z., & Zhu, G. (2000). In-depth fluid diversion by pre-gelled particles. laboratory study and pilot testing, In SPE/DOE improved oil recovery symposium, Doi: https://doi.org/10.2118/59362-MS.
[15]. Ganguly, S., Willhite, G. P., Green, D. W., & McCool, C. S. (2002). The effect of fluid leakoff on gel placement and gel stability in fractures, SPE Journal, 7(03): 309-315. Doi: https://doi.org/10.2118/79402-PA.
[16]. Bai, B., Li, L., Liu, Y., Liu, H., Wang, Z., & You, C. (2007). Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and applications, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 10(04): 415-422. Doi: https://doi.org/10.2118/89389-PA.
[17]. Bai, B., Liu, Y., Coste, J. P., & Li, L. (2007). Preformed particle gel for conformance control: transport mechanism through porous media, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 10(02): 176-184, Doi: https://doi.org/10.2118/89468-PA.
[18]. Chauveteau, G., Tabary, R., Le Bon, C., Renard, M., Feng, Y., & Omari, A. (2003, May). In-depth permeability control by adsorption of soft size-controlled microgels, In SPE European Formation Damage Conference, Doi: https://doi.org/10.2118/82228-MS.
[19]. Al-Anazi, H. A., & Sharma, M. M. (2002, February). Use of a pH sensitive polymer for conformance control. In International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Doi: https://doi.org/10.2118/73782-MS.
[20]. Pritchett, J., Frampton, H., Brinkman, J., Cheung, S., Morgan, J., Chang, K. T., & Goodgame, J. (2003). Field application of a new in-depth waterflood conformance improvement tool, In SPE international improved oil recovery conference in Asia Pacific, Doi: https://doi.org/10.2118/84897-MS.
[21]. Khoshkar, P. A., Fatemi, M., & Ghazanfari, M. H. (2020). Static and dynamic evaluation of the effect of nanomaterials on the performance of a novel synthesized PPG for water shut-off and improved oil recovery in fractured reservoirs, Journal of Petroleum Science and Engineering, 189, 107019. Doi: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107019.
[22]. Paprouschi, A., Fatemi, M., & Ghazanfari, M. H. (2021). Effect of silicate sodium and graphene nanoplatelets on morphology and rheology characteristics of new synthesized preformed particle gel (PPG) for water shut-off treatment, Journal of Petroleum Science and Engineering, 204, 108736, Doi: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108736.
[23]. Seright, R. S. (1999). Mechanism for gel propagation through fractures, paper SPE, 55628, 15-19, Doi: https://doi.org/10.2118/55628-MS.
[24]. Seright, R. S. (1997). Use of preformed gels for conformance control in fractured systems, SPE production & facilities, 12(01), 59-65, Doi: https://doi.org/10.2118/35351-PA.
[25]. Seright, R. S. (2001). Gel propagation through fractures, SPE Production & Facilities, 16(04): 225-231, Doi: https://doi.org/10.2118/74602-PA.
[26]. Zhang, H., & Bai, B. (2011). Preformed-particle-gel transport through open fractures and its effect on water flow. SPE Journal, 16(02): 388-400, Doi: https://doi.org/10.2118/129908-PA.
[27]. Imqam, A., Bai, B., Ramadan, M. A., Wei, M., Delshad, M., & Sepehrnoori, K. (2015). Preformed-particle-gel extrusion through open conduits during conformance-control treatments, SPE Journal, 20(05): 1083-1093, Doi: https://doi.org/10.2118/169107-PA.
[28]. Imqam, A., & Bai, B. (2015). Optimizing the strength and size of preformed particle gels for better conformance control treatment, Fuel, 148, 178-185, Doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.022.
[29]. Baker, J. P., Blanch, H. W., & Prausnitz, J. M. (1995). Swelling properties of acrylamide-based ampholytic hydrogels: comparison of experiment with theory, Polymer, 36(5): 1061-1069. Doi: https://doi.org/10.1016/0032-3861(95)93608-O.
[30]. Anderson, J. W., Neff, J. M., Cox, B. A., Tatem, H. E., & Hightower, G. M. (1974). Characteristics of dispersions and water-soluble extracts of crude and refined oils and their toxicity to estuarine crustaceans and fish, Marine biology, 27(1): 75-88. Doi: https://doi.org/10.1007/BF00394763.

[31]. Jing, W., Hongling, Z., Huiqing, L., Wei, Z., Haomin, L., Chuanjin, Y., & Yinghao, S. (2017). Quantification of transportation of deformable gel particles in porous media, In SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Doi: https://doi.org/10.2118/187266-MS.
[32]. Zhao, Y., & Bai, B. (2022). Selective penetration behavior of microgels in superpermeable channels and reservoir matrices, Journal of Petroleum Science and Engineering, 210, 109897, Doi: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109897.
[۳۳]. رفیع پور، م.، وفایی سفتی، م.، حق طلب، ع.، رزاقی کاشانی، م. و سلیمی، ف. (۱۳۹۱). بررسی خواص رئولوژیکی و کارایی هیدروژل های پلی اکریل آمید-کروم در چاه های نفت دما بالا. پژوهش نفت، ۲۲(۶۹): ۳-۱۶، SID: https://sid.ir/paper/114737/fa.
[۳۴]. حیدری، ا.، وفایی سفتی، م.، واشقانی فراهانی، ا.، باغبان صالحی، م. و نادری، ح. (۱۳۹۶). بررسی تأثیر قطر ذرات از پیش تشکیل شده ژل پلیمر (پلی اکریل آمید و استات کروم) در کاهش نامتجانس تراوایی، پژوهش نفت، ۲۷(۹۷): ۱۴۲-۱۵۴، SID: https://sid.ir/paper/115145/fa.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۴۲-۲۴

استفاده از الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی باران جهت شبیه‌سازی حرکت دوغاب سیال در شکاف و ماتریکس

حجت نوری* و علی عالی انوری

گروه مهندسی معدن، دانشکده گروه مهندسی، دانشگاه کاشان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳

چکیده

الگوریتم بهینه‌سازی باران (ROA) یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت می‌باشد که با شبیه‌سازی حرکت قطرات باران به یافتن جواب بهینه برای مسائل پیچیده بهینه‌سازی می‌پردازد. این الگوریتم با حرکت دادن قطرات باران به‌سمت نقاط کمترین با توجه به قطر قطرات باران، قادر است با سرعت و دقت قابل قبولی نقاط کمترین یا بیشترین یک تابع یا مسأله بهینه‌سازی را پیدا کند. جهت بهبود قابلیت جستجو و اکتشاف در این الگوریتم، یک جستجوی تصادفی پیش از شروع به حل مسأله توسط این الگوریتم به این روش اضافه شد که این موضوع از بمب‌های خوشه‌ای الهام گرفته شده است. بدین ترتیب قبل از شروع به بهینه‌سازی توسط ROA، ابتدا نقاط تصادفی در اطراف این قطره باران انتخاب می‌شود و جستجو از نقطه‌ای شروع می‌شود که مقدار کمتری داشته باشد. به همین علت نام الگوریتم جدید به الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی باران IROA تغییر یافت. کارایی بهینه‌ساز پیشنهادی از طریق بهینه‌سازی یک مسأله شبیه‌سازی در مهندسی معدن (شبیه‌سازی حرکت دوغاب سیمان در ماتریکس و شکاف) آزمایش شد و عملکرد آن با چندین الگوریتم فراابتکاری شناخته شده مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که IROA قادر است با ارائه سرعت همگرایی سریع‌تر و همچنین کارآمدتر در مقایسه با سایر بهینه‌سازهای موفق منجر به‌دست‌یابی به به جواب‌های دقیق‌تر در مسائل پیچیده بهینه‌سازی شود.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی باران، الگوریتم فراابتکاری، دوغاب سیمان، سرعت همگرایی، ماتریکس

مقدمه

با توسعه کامپیوترهای قدرتمند، روش‌های جدید و نوینی برای حل برخی از مسائل پیچیده در حوزه مهندسی ارائه گردید. برخی از این روش‌ها که الگوریتم‌های فراابتکاری نامیده می‌شوند، مثل الگوریتم خفاش یا الگوریتم کلونی مورچگان از طبیعت الهام گرفته شده‌اند و یک پدیده طبیعی را جهت پیدا کردن بهترین جواب شبیه‌سازی می‌کنند. امروزه این الگوریتم‌ها قادرند روشی قدرتمند جهت حل بسیاری از مسائل پیچیده مهندسی را ارائه دهند

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی hnouri_ir@yahoo.com
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.4953.3209)

هر چند ممکن است گاهی در کم‌ترین‌های نسبی با مشکل مواجه می شوند. اصطلاح الگوریتم‌های فراابتکاری یک مفهوم بسیار بالاتر نسبت به‌واژه مورد استفاده برای الگوریتم‌های ابتکاری را نشان می‌دهد و امروزه این الگوریتم‌ها برای حل طیف وسیعی از مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شوند. اخیراً الگوریتم‌های فراابتکاری زیادی برای حل مسائل غیرقابل حل به‌کار گرفته شده‌اند. جذابیت استفاده از این الگوریتم‌ها در این است که آن‌ها قادر هستند جواب بهینه یا حل مسائل بسیار پیچیده را در زمانی بسیار کوتاه به‌دست آورند [۱]. مسائل بهینه‌سازی که توجه روش‌های فراابتکاری را به‌خود جلب کرده‌اند واریانس زیادی دارند، از توابع یک تا چند هدفه، پیوسته تا گسسته و یا محدود تا غیرمحدود. حل این مسائل به دلیل رفتار پیچیده آن‌ها کار ساده‌ای نیست. الگوریتم‌های دقیق اکثراً چند جمله‌ای نیستند و همچنین ارائه بهترین راه حل‌ها توسط این الگوریتم ها معمولاً دارای زمان اجرای غیرعملی و یا الزامات محاسباتی بسیار زیاد هستند. الگوریتم‌های فراابتکاری یک راه حل عملی و کاربردی برای بسیاری از این مسائل ارائه می‌دهند و برای دست‌یابی به راه حل‌های تقریبی/ بهینه در زمان اجرای عملی، برای مسائل بهینه‌سازی بسیار سخت طراحی شده‌اند [۲ و ۳]. اکثر الگوریتم‌های هنرمندانه فراابتکاری ارائه شدند و به نام الگوریتم‌ها فراابتکاری کلاسیک شناخته می‌شوند که برخی از آن‌ها عبارتند از:

الگوریتم‌های ژنتیک (GA) [۴]، تکامل دیفرانسیل (DE) [۵]، برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) [۶]، جستجوی تابو (TS) [۷]، روش جستجوی تصادفی تطبیقی هدفمند (GRASP) [۸]، جستجوی محلی تکراری (ILS) [۹]، الگوریتم جهش قورباغه مختلط (SFLA) [۱۰]، ذرات بهینه‌سازی ازدحام [۱۱]، جستجوی پراکنده (SS) [۱۲]، بهینه‌سازی کلونی مورچه ها (ACO) [۱۳]. علی‌رغم دست‌آوردهای الگوریتم‌های کلاسیک فراابتکاری، رویکردهای تکاملی جدید و بدیع نیز در دو دهه گذشته با موفقیت ظهور کردند. تحقیق در مورد الگوریتم‌های فراابتکاری در این دوران، تعداد زیادی از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید را با الهام از فرآیندهای تکاملی یا رفتاری خاص معرفی می‌کند. در بسیاری از موارد، این موج جدید رویکردهای فراابتکاری، بهترین راه حل‌ها را برای برخی از مجموعه‌های توابع بنچمارک ارائه می‌دهد. برخی از این الگوریتم‌ها که به نام الگوریتم‌های فراابتکاری نسل جدید[1] شناخته می‌شوند، عبارتند از:

الگوریتم بهینه‌سازی باران (ROA) [۱۴]، الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) [۱۵]، جستجوی ارگانیسم‌های همزیست (SOS) [۱۶]، الگوریتم گرگ خاکستری (GWA) [۱۷]، بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی (SSO) [۱۸]، آموزش بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری (TLBO) [۱۹]، الگوریتم کرم شب تاب (FA) [۲۰]، الگوریتم خفاش (BA) [۲۱]، الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA)، تغذیه باکتری‌ها (BFO) [۲۲]، بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BFO) [۲۳]، کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC) [۲۴].

در این تحقیق یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری در دسته اخیر یعنی الگوریتم بهینه‌سازی باران (ROA)، انتخاب شد و با ایجاد مقداری بهبود در روش یافتن جواب یک الگوریتم پر سرعت‌تر و با قابلیت بیشتر بوجود آمد که به نام الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی باران[2] (IROA) اسم‌گذاری شد. این الگوریتم قادر است با سرعتی بسیار بیشتر و در زمانی کمتر نسبت به ROA و با تعداد NFE بسیار کمتر به جواب برخی از مسائل پیچیده بهینه‌سازی دست یابد. پس از معرفی این الگوریتم و مقایسه کارایی آن نسبت به برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری قدرتمند، یک مسأله بسیار پیچیده شبیه‌سازی مربوط به حرکت دوغاب سیمان در شکاف و ماتریکس با استفاده از این الگوریتم بهبود یافته حل خواهد شد.

1. New Generation
2. Improved Rain Optimization Algorithm

مبانی الگوریتم بهینه‌سازی باران (ROA)

قبل از پرداخت به IROA بهتر است کمی به مبانی و روش کار الگوریتم باران پرداخته شود. همان‌گونه که از نام این الگوریتم مشخص است، حل مسأله توسط این الگوریتم از پدیده باران الهام گرفته شده است. قطرات باران در هنگام بارندگی به‌سمت نقاط کم ارتفاع‌تر حرکت می‌کنند و در نقاط پست و دارای ارتفاع کمتر جمع می‌شوند. در مسائل بهینه‌سازی نیز جواب یا جواب‌های مسأله در واقع نقاط بیشترین و کمترین هستند و معمولاً نقاطی که کمترین هزینه را در بر می‌گیرند به‌عنوان جواب مسأله انتخاب می‌شوند. به‌طور مثال از بین تمام مسیرهایی که می‌توان از شهر A به شهر B رسید، مسیری که کمترین فاصله را دارد به‌عنوان مسیر بهینه انتخاب می‌شود. بنابراین اگر یک مسأله بهینه‌سازی دو بعدی مشابه سطح زمین که دارای ناهمواری‌های زیادی می‌باشد، در نظر گرفته شود، نقاطی که قطرات باران در آن فرود می‌آیند را می‌توان به‌عنوان برخی از جواب‌های احتمالی این مسأله در نظر گرفت. بنابراین در الگوریتم بهینه‌سازی باران، سطح زمین به‌عنوان صورت مسأله و قطرات باران به‌عنوان جواب‌های احتمالی و شانسی مسأله در نظر گرفته می‌شود. این قطرات تحت سازوکارهای متفاوت که در ادامه توضیح داده می‌شود می‌توانند حرکت کنند، تغییر شکل دهند یا از بین بروند. به همین ترتیب، قطرات جدید (یا جواب‌های احتمالی جدید) تولید می‌شوند و در مسیر تکامل قرار می‌گیرند. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که یکی از قطرات به نقطه مورد نظر که همان جواب مسأله می‌باشد برسد.

هنگامی‌که بارندگی آغاز می‌شود، قطرات باران در نقاط مختلف زمین پراکنده می‌گردند و پس از آن دو اتفاق مهم ممکن است برای هر قطره باران رخ دهد: اگر قطره باران بر زمین مسطح فرود آید ممکن است قسمتی از آن توسط خاک جذب شود و یا قسمتی از آن توسط آفتاب بخار گردد. در این صورت با گذشت زمان اندازه قطره باران می‌تواند کاهش یابد. اگر این قطره باران بر سطحی شیب‌دار فرود آید، می‌تواند به‌سمت نقاط پایین‌تر حرکت کند و در همین حال ممکن است هنگام حرکت به‌سمت نقاط پایین‌تر با قطرات دیگر باران برخورد کند و قطر آن افزایش یابد و در عین حال تعداد جمعیت اولیه کاهش یابد. با حرکت قطرات باران به‌سمت نقاط پایین‌تر، احتمال برخورد قطرات باران با یکدیگر و تشکیل قطرات بزرگ‌تر بیشتر می‌شود و این کار تا جایی ادامه می‌یابد که هر قطره یا مجموعه قطرات بتوانند خود را به یک نقطه کمترین یا یک مانع در مسیر حرکت برسانند. در این صورت حرکت قطرات متصل شده به یکدیگر متوقف می‌شود و با ساکن شدن قطرات دوباره فرآیند جذب یا تبخیر آن‌ها شروع می‌شود. در حقیقت هر قطره یا مجموعه قطرات در نقاط کمترین نسبی تجمع می‌یابند و تشکیل دریاچه‌های فصلی را می‌دهند. با گذشت زمان و پس از توقف بارندگی این دریاچه‌ها کوچک و کوچک‌تر می‌شوند و مختصات آن نقطه کمترین (جواب مسأله) دقیق‌تر به‌دست خواهد آمد. نکته قابل توجه در الگوریتم باران این است که هر قطره باران تنها یک نقطه یا یکی از جواب‌ها نیست بلکه هر قطره باران دارای یک مختصات مربوط به مرکز قطره و شعاع قطره می‌شود. به این ترتیب هر قطره بلافاصله پس از رسیدن به زمین، یک سطح کوچک را تر می‌کند و در محدوده شعاع خود، می‌تواند اطراف خود را بررسی کند و در حقیقت دارای نوعی آگاهی به اطراف خود است. ROA قادر است تمام اکسترمم‌های نسبی یک تابع را پیدا کند و به این ترتیب نقطه قوت و نقطه تمایز این الگوریتم نسبت به بقیه الگوریتم‌ها در همین مسأله است، چون اکثر الگوریتم‌های بهینه‌سازی تنها به یک جواب می‌رسند ولی در مسائل عملی بسیار پیش می‌آید که به تمام نقاط اکسترمم نیاز باشد.

پیاده‌سازی ROA

در ایـن قسـمت بـه پیاده‌سـازی الگوریتـم بـاران براسـاس آنچـه در قسـمت قبـل گفتـه شـد، پرداختـه می‌شـود. هـر جـواب احتمالـی مسـأله را می‌تـوان بـا یـک قطـره بـاران (pop_i) مـدل کـرد. هـر قطـره بـاران دارای یـک مختصات برحسب ابعـاد مسأله و یـک قطـر می‌باشـد کـه هـر دوی آن‌هـا یعنـی مختصـات نقطـه مـورد نظـر و شـعاع قطـره بـاران به‌صـورت تصادفـی و در یـک بـازه مشـخص انتخـاب می‌شـود. بسـته بـه این‌کـه مسـأله چقـدر پیچیـده باشـد، تعـداد قطـرات اولیـه بـاران (n_{pop}) کـه نشـان‌دهنده جمعیـت اولیـه اسـت به‌صـورت اختیـاری انتخـاب خواهـد شـد. تعـداد حدس‌هـای اولیـه (قطـرات اولیـه بـاران) پارامتـر بسـیار مهمـی اسـت و می‌توانـد به‌شـدت بـر فرآینـد رسـیدن بـه جـواب موثـر باشـد. اگـر جمعیـت اولیـه مقـدار کمـی باشـد، ممکـن اسـت جـواب مسـأله پیـدا نشـود و اگـر جمعیـت اولیـه زیـاد باشـد، زمـان حـل مسـأله و در نتیجـه هزینـه حـل مسـأله به‌صـورت قابـل توجهـی افزایـش خواهـد یافـت. پـس از آن بـرای هـر قطـره بـاران، مقـدار تابـع هـدف محاسـبه می‌شـود. تابـع هـدف در حقیقـت همـان مسـأله مـورد نظـر اسـت کـه الگوریتـم بـه دنبـال حل آن اسـت. پـس از پیاده‌سـازی الگوریتـم به‌راحتـی می‌تـوان تابـع هـدف را تغییـر داد و بـه ایـن ترتیـب می‌تـوان هـر تابـع دلخواهـی را به‌عنـوان تابـع هـدف انتخـاب کـرد. ایـن تابـع می‌توانـد سـاده یـا بسـیار پیچیـده باشـد و بـا تغییـر ایـن تابـع زمـان و هزینـه حـل مسـأله تغییـر خواهـد کـرد.

اگـر مسـأله در فضـای دو بعـدی حـل شـود، مختصـات محـل قرارگیـری هـر قطـره بـاران تنهـا از دو متغیـر (x,y) تشـیکل شـده اسـت امـا هنگامی‌کـه مسـأله در فضـای n بعـدی $[x_1,x_2,\ldots,x_n]$ حـل می‌شـود، محـل هـر قطـره بـاران از n متغیـر تشـکیل شـده اسـت:

$$var = [var_1, var_2, \ldots, var_n] \qquad (۱)$$

پـس از انتخـاب جمعیـت اولیـه و پیـدا کـردن مقـدار تابـع هـدف بـه‌ازای هـر یـک از ایـن نقـاط، نقطـه‌ای کـه دارای کمتریـن مقـدار تابـع هـدف باشـد به‌عنـوان جـواب اولیـه مسـأله انتخـاب می‌شـود. ایـن جـواب ممکـن اسـت بـا جـواب اصلـی مسـأله فاصلـه زیـادی داشـته باشـد ولـی در هـر صـورت از بقیـه جواب‌هـای حـدس زده شـده بهتـر اسـت. در ادامـه در تعـداد مشـخصی تکـرار سـعی می‌شـود جـواب مسـأله بهبـود پیـدا کنـد. بـرای ایـن منظـور در هـر تکـرار هـر قطـره بـاران، بسـته بـه انـدازه شـعاع خـود (R_n)، مقـدار تابـع هـدف را در هـر یـک از کرانه‌هـای خـود بـه‌ازای هـر متغیـر چـک می‌کنـد. بنابرایـن اگـر تابـع هـدف را بـا CostFunction نشـان دهیـم، بـرای تابعـی بـا n متغیـر، در هـر تکـرار بـرای هـر قطـره بـاران 2n مرتبـه تابـع هـدف محاسـبه می‌شـود:

$$Cost_{var_1} = CostFunction(var_1 \pm R_1, var_2, \ldots, var_n) \qquad (۲)$$

$$Cost_{var_2} = CostFunction(var_1, var_2 \pm R_2, \ldots, var_n) \qquad (۳)$$

$$Cost_{var_n} = CostFunction(var_1, var_2, \ldots, var_n \pm R_n) \qquad (۴)$$

بـرای درک بهتـر فـرض کنیـد کـه مسـأله در فضـای دو بعـدی قـرار دارد و در حقیقـت قطـره بـاران بـرروی یـک سـطح قـرار گرفتـه اسـت. اگـر سـطح مـورد نظـر کـه قطـره روی آن قـرار گرفتـه اسـت، افقـی نباشـد و شـعاع قطـره بـه انـدازه کافـی کوچـک باشـد، مقـدار تابـع هـدف در کرانه‌هـای قطـره بـا مقـدار تابـع هـدف در مرکـز آن متفـاوت خواهـد بـود. اگـر مختصـات مرکـز قطـره (x,y) باشـد، مختصـات کرانه‌هـا در جهـت x برابـر بـا (x+R,y) و (x-R,y) خواهـد بـود. بـه همیـن ترتیـب مختصـات کرانه‌هـا در جهـت y برابـر بـا (x, y+R) و (x,y-R) می‌باشـد. مقـدار تابـع هـدف در ایـن چهـار نقطـه چـک می‌شـود و از بیـن ایـن چهـار نقطـه، دو نقطـه بـا ارتفـاع کمتـر (مقـدار تابـع هـدف کمتر) نسـبت بـه مرکـز قطـره مشـخص می‌شـود. بـه ایـن ترتیـب دو جهـت بـرای حرکـت قطـره مشـخص می‌شـود کـه اگـر قطـره بـاران به‌انـدازه شـعاع خـود در هـر یـک از ایـن دو جهـت حرکـت کنـد، مقـدار تابـع هـدف کاهـش می‌یابـد. نهایتـاً برآینـد ایـن دو جهـت به‌عنـوان جهـت

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۴۲-۲۴

اصلی حرکت برای قطره تعریف می‌شود و مرکز قطره باران به اندازه شعاع قطره در این جهت حرکت می‌کند. به این ترتیب موقعیت قطره باران کمی بهبود پیدا می‌کند و به نقطه کمترین نزدیک‌تر می‌شود. جهت کاهش هزینه محاسبات، تازمانی‌که مقدار تابع هدف با حرکت قطره در جهت قبلی کاهش پیدا می‌کند، قطره در این جهت حرکت داده می‌شود. برای این کار، از مرکز قطره به اندازه شعاع قطره در جهت قبلی حرکت می‌کنیم، مقدار تابع هدف را در این نقطه محاسبه می‌کنیم و درصورتی‌که مقدار تابع هدف در نقطه جدید از مقدار تابع هدف در جهت قبلی کمتر بود، موقعیت قطره باران را به نقطه جدید تغییر می‌دهیم. همین عملیات برای تمام قطرات انجام می‌شود. به این ترتیب در هر تکرار موقعیت هر قطره ممکن است تغییرات زیادی داشته باشد و با سرعت زیاد به‌سمت نقاط کمترین حرکت کند. چگونگی انتخاب بهترین جهت برای حرکت هر قطره باران توسط تابع نشان داده شده در شکل ۱ نشان داده می‌شود: به این ترتیب هر قطره باران یک جهت به‌سمت نقاط پائین‌تر پیدا می‌کند و سپس قطره باران به‌اندازه شعاع خود در جهت مشخص شده در مرحله قبل حرکت می‌کند. نکته اینجاست تا زمانی که مقدار تابع هدف در حال کاهش می‌باشد، این قطره در جهت مشخص شده حرکت می‌کند (شکل ۲). درصورتی‌که قطره باران دیگر نتواند به نقاط پائین‌تر هدایت شود، قطر قطره باران با نسبت از قبل مشخص شده‌ای کاهش می‌یابد. به‌طور مثال اگر قطره باران در جهت مشخص شده حرکت کند و مقدار تابع هدف افزایش یابد، قطره بدون اینکه حرکت را انجام دهد کوچک‌تر می‌شود. این امر باعث می‌شود که در تکرار بعدی جستجو محلی قطره با دقت بیشتری انجام شود. اگر اندازه قطره باران از مقدار مشخصی کوچک‌تر شود این قطره حذف خواهد شد. قطرات نزدیک به هم، به یکدیگر متصل می‌شوند و تشکیل یک قطره باران را می‌دهند. این کار باعث می‌شود سرعت رسیدن به‌جواب به‌شدت افزایش یابد. به این منظور در هر تکرار پس اینکه موقعیت جدید هر قطره پیدا شد، فاصله هر قطره باران با تمام قطرات دیگر محاسبه می‌شود و قطراتی که از یک مقدار مشخص (مثلا دو برابر شعاع یک قطره) به هم نزدیک باشند به‌هم متصل می‌شوند و تشکیل یک قطره را می‌دهند.

```
for k=1:i
    pop_new=pop;
    pop_new.Position(k)=pop_new.Position(k)+Ri;
    pop_new.Cost=cost_function(pop_new.Position);
    pop.Direction(k)=(pop.Cost-pop_new.Cost)/(pop.Position(k)-
pop_new.Position(k));
end
Return pop.Direction
```

شکل ۱ الگوریتم و تابع استفاده شده جهت هدایت یک نقطه به‌سمت نقطه کمترین

```
while(popm.Cost<pop.Cost)

    pop=popm;
    popm.Position=ChangePosition(pop.Position,pop.Radd,pop.Direction,nVar,
    VarMin, VarMax);
    popm.Cost=cost_function(popm.Position);
end
```

شکل ۲ الگوریتم و تابع استفاده شده برای حرکت دادن یک نقطه در یک جهت مشخص مادامیکه مقدار تابع هدف درحال کاهش است

همچنیــن در هــر تکــرار تعــدادی از قطــرات موجــود کـه دارای مقـدار تابـع هـدف بیشـتری نسـبت بـه بقیـه قطــرات هســتند، حــذف می‌شــوند و به‌جــای آن‌هــا قطــرات جدیــد جایگزیــن می‌شــوند. تعــداد قطــرات حـذف شـده و یـا تعـداد قطـرات جدیـد اضافـه شـده تاثیـر زیـادی بـر سـرعت رسـیدن بـه جـواب نهایـی دارد. بــه ایــن ترتیــب ایــن مکانیــزم باعــث می‌شــود همیشــه بارندگــی ادامــه داشــته باشــد و نقــاط جدیــد کشـف شـوند. براسـاس آنچـه در ایـن قسـمت گفتـه شـد می‌تــوان الگوریتــم مربــوط بــه‌روش بهینه‌ســازی بــاران را در شـکل ۳ مشــاهده نمــود.

الگوریتم بهبود یافته باران IROA

در الگوریتــم بهینه‌ســازی بــاران ROA، همان‌گونــه کـه در قسـمت قبـل توضیـح داده شـد، در ابتـدا مـکان قطــرات بــاران به‌صــورت رنــدوم انتخــاب می‌شــود و سـپس هـر قطـره بـاران طـی پروسـه‌ای کـه شـرح داده شــد به‌ســمت نقــاط مینمــم حرکــت می‌کنــد و در نهایـت بـا کوچک‌تـر شـدن قطـره بـاران در هـر تکـرار دقـت جـواب افزایـش می‌یابـد. نکتـه منفـی کـه در ایـن الگوریتــم وجــود داشــت و گاهــی باعــث عــدم یافتــن پاســخ بــا هزینــه معقــول می‌گشــت ایــن اســت کــه ممکـن اسـت قطـر قطـرات بـاران خیلـی سـریع و قبـل از اینکـه بـه منطقـه اکسـترمم مـورد نظـر برسـیم بسـیار کوچـک شـود و تعـداد NFE [1] به‌شـدت افزایـش یابـد. همچنیـن در بسـیاری از مـوارد قطـره بـاران بایـد مسـیر بسـیار طولانـی را به‌صـورت لاکپشـتی تـا منطقـه مـورد نظـر طـی کنـد. بنابرایـن بـرای حـل ایـن مشـکل بـر آن شـدیم کـه قطـره بـاران انتخـاب شـده به‌صـورت رنـدم، ابتـدا یـک جسـتوی کلـی انجـام دهـد و پـس از آن بـه‌روش ROA به‌دنبـال مقـدار دقیـق جـواب بگردیـم. به‌گفتـه دیگـر، الگوریتـم در هـر تکـرار بـرای هـر قطـره بـاران بـه دو روش جسـتجو را انجـام خواهـد داد:

۱- جستجوی کلی
۲- جستجوی موضعی

جســتجوی محلــی در واقــع همــان الگوریتــم بــاران می‌باشــد ولــی جســتجو کلــی به‌صــورت زیــر انجــام می‌شــود:

هـر قطـره بـاران در ابتـدا و قبـل از اینکـه تحـت الگوریتم بـاران حرکـت کنـد.

```
objective function f(X), X=(x1,x2,…,xn)

Input initial tuning parameters such as population number (nPop), maximum iteration (MaxIt), number of variables (nVar), the domain of variables ([VarMin, VarMax]), initial droplet's radius (InitR) and number of jointed droplets (size), rain speed (Speed) and Soil adsorption Constant (α).

Initialize droplets position, radius and size.

Evaluate each droplet with the objective function to obtain the cost of each droplet and sort population based on cost.

Main loop:
    While (iteration number < MaxIt)
        For ( each droplet)
            Change each variable xi to xi+Ri and xi-Ri and evaluate the new position by the objective function.
            If the new cost is smaller then the previous cost, accept a new position for xi.

            while (cost reduces)
                move the droplet at the same direction with the same velocity,
                reduce size of droplet depending on the soil adsorption properties
                joint near droplets to each other, change size of new droplets
            end while

        end for
        omit weak droplets depending on soil adsorption
        generate new droplets depending on rain speed
    end while

Sort populations based on cost.

Show results and visualizations.
```

شکل ۳ شبه کدهای مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی باران

1. Number of Function Evaluation

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۴۲-۲۴

به تعداد مشخصی قطره کوچک‌تر تبدیل شده و در فضای جستجو پراکنده می‌شود؛ درست مثل اینکه یک بمب خوشه‌ای در یک نقطه منفجر شود (شکل ۴).



شکل ۴ چگونگی تبدیل یک بمب بزرگ‌تر به بمب‌های کوچک‌تر در بمب‌های خوشه‌ای

در این حالت تعدادی بمب کوچک‌تر به‌صورت تصادفی در اطراف بمب اصلی پراکنده می‌شوند. اینکه هر قطره باران به چند قطره کوچک‌تر تقسیم شود و تا چه فاصله‌ای از قطره اصلی پراکنده شود، جزو پارامترهای ورودی شبکه خواهد بود. بدین ترتیب، در مرحله اول هر قطره باران به تعدادی قطره کوچک‌تر که در اطراف آن پراکنده شده‌اند تبدیل می‌شود و مقدار تابع هدف برای هر یک از قطرات کوچک‌تر محاسبه می‌شود و قطره‌ای که دارای کوچک‌ترین مقدار تابع هدف باشد، با قطره اصلی جایگزین می‌گردد. سپس این قطره تحت الگوریتم باران به حرکت در آمده و به یک نقطه بهتر می‌رسد. همین پروسه برای بقیه قطرات باران اتفاق می‌افتد تا به آخرین قطره برسیم. در تکرار بعدی دوباره همین سناریو انجام خواهد شد. یعنی در ابتدا یک جستجوی کلی و سپس یک جستجوی محلی انجام خواهد شد. شکل ۵ الگوریتم مربوط به IROA را بهتر نشان می‌دهد. بنابراین در هر تکرار با دو شعاع روبرو هستیم: شعاع جستجوی کلی (R_1) و شعاع قطره باران (R_2) که هر دوی آنها در هر تکرار می‌توانند کاهش یابند و یا آنکه ثابت بمانند. پیشنهاد می‌شود مقدار R_1 در اولین تکرار برابر با نصف دامنه جستجو انتخاب شود:

$$R_1 = \frac{\text{var}_{\max} - \text{var}_{\min}}{2} \qquad (۵)$$

هرگاه الگوریتم در حین انجام جستجوی کلی برای یک قطره باران، در یک تکرار موفق به بهبود مکان قطره باران شود، می‌توان مقدار R_1 را مقداری کاهش داد تا در تکرار بعدی حتی شعاع جستجوی کلی تنگ‌تر شود و این امر باعث بهبود نتایج نهایی گردد.

```
objective function f(X), X=(x1, x2,…,xn)

Input initial tuning parameters such as population number (nPop), maximum iteration (MaxIt), number of variables (nVar), the domain of
variables ([VarMin, VarMax]), Initial radius of overall search(R1), initial droplet's radius (R2) and number of jointed droplets (size), rain
speed (Speed) and Soil adsorption Constant(α).

Initialize droplets position, radius and size.

Evaluate each droplet with the objective function to obtain the cost of each droplet and sort population based on cost.

Main loop:
    While (iteration number < MaxIt)
        For ( each droplet)
            Find randomly nCluster droplets around this droplet.
            Evaluate new droplets with the objective function.
            Find the droplet with minimum cost.
            Replace this droplet with the main droplet and reduce R1 to 0.8R1
        End For
        For ( each droplet)
            Change each variable xi to xi+Ri and xi-Ri and evaluate the new position by the objective function.
            If the new cost is smaller than the previous cost, accept a new position for xi.

            while (cost reduces)
                move the droplet at the same direction with the same velocity,
                reduce size of droplet depending on the soil adsorption properties
                joint near droplets to each other, change size of new droplets
            end while

        end for
        omit weak droplets depending on soil adsorption
        generate new droplets depending on rain speed
    end while

Sort populations based on cost.

Show results and visualizations.
```

شکل ۵ شبه کدهای مربوط به الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی باران

$$R_1 = \alpha R_1 \quad (۶)$$

در این تحقیق مقدار α برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شده است.

اعتبارسنجی و مقایسه

پیاده‌سازی الگوریتم بهینه یافته باران با توجه به مطالب ارائه شده در سکشن قبل کار سختی نیست. کدهای مربوط به IROA توسط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد تا بتوان نتایج به‌دست آمده از این الگوریتم برای حل توابع بنچ[1] مارک مختلف با دیگر الگوریتم‌های مطرح در این زمینه از جمله الگوریتم ژنتیک، الگوریتم PSO، الگوریتم خفاش BA و نیز الگوریتم باران مقایسه گردد و توانایی حل مسأله و سرعت و قدرت این الگوریتم مشخص شود. بنابراین در این قسمت کارایی این الگوریتم از سه نقطه نظر مورد بررسی قرار خواهد گرفت:

۱- بررسی عملکرد IROA با استفاده از یک تابع معیار مشخص با جزئیات کامل و مقایسه عملکرد آن با الگوریتم باران

۲- بررسی عملکرد الگوریتم IROA در حل ۲۶ تابع معیار مهم و معروف و مقایسه نتایج به‌دست آمده با الگوریتم‌های دیگر

۳- بررسی عملکرد IROA در حل یک مسأله شبیه‌سازی مربوط به تزریق دوغاب سیمان در یک سیستم متشکل از ماتریکس و شکاف

بررسی عملکرد IROA در حل تابع Eggcreate

جهت بررسی نحوه علکرد IROA در پیدا کردن جواب‌های مسائل بهینه‌سازی، تابع Eggcreate به‌عنوان یک تابع معیار مهم انتخاب گردید. این تابع به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{D} x_i^2 + 25\sin^2(x_i) \quad (۷)$$

$$x \in [-5,5]^D$$

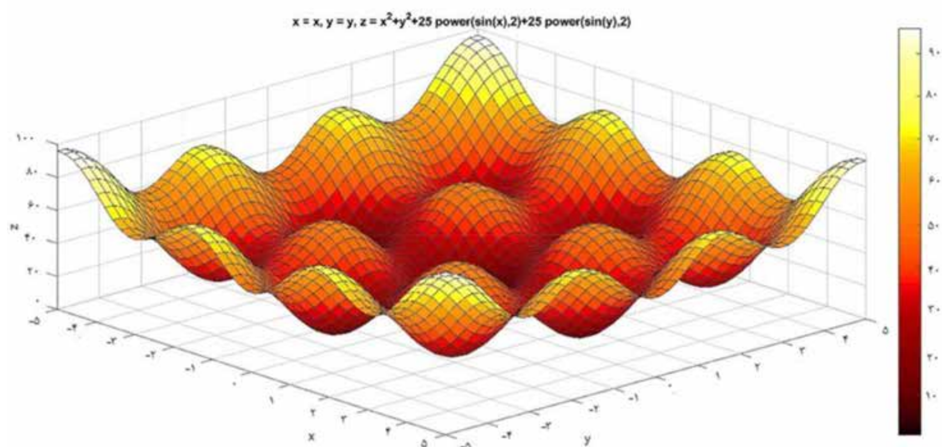
شکل ۶ تابع eggcrate را در سه‌بعد و در دامنه تعریف شده بالا نشان می‌دهد: این تابع دارای یک کمترین مطلق با مقدار صفر در $x_1=0, x_2=0$ می‌باشد. همچنین علاوه‌بر این نقطه ۸ کمترین نسبی دیگر مطابق جدول ۱ برای این تابع قابل تشخیص است: الگوریتم IROA با پارامترهای زیر برای حل این مسأله اجرا شد:

تعداد جمعیت اولیه (nPop): ۱۰۰

بعد متغیرها (D): ۳

مقدار کمترین فضای جستجو[2] (VarMin): ۵-

مقدار ماکسیمم فضای جستجو[3] (VarMax): ۵



شکل ۶ نمای سه‌بعدی تابع Eggcrete

1. Benchmark Function
2. Minimum of Search Space
3. Maximum of Search Space

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۴۲-۲۴

جدول ۱ مقادیر و موقعیت کم‌ترین‌های نسبی در تابع Eggcrete

f (x*)	x *
۹/۵	[۳ و ۰]
۹/۵	[-۳ و ۰]
۹/۵	[۰ و ۳]
۹/۵	[۰ و -۳]
۹/۵	[۳ و ۳]
۹/۵	[۳ و -۳]
۹/۵	[-۳ و ۳]
۹/۵	[-۳ و -۳]

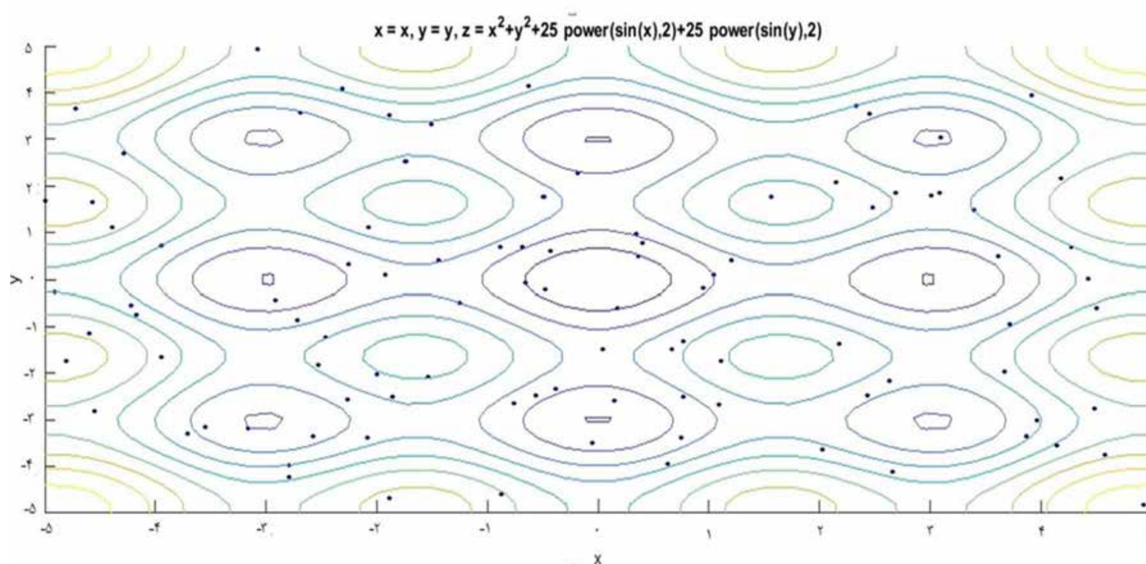
تعداد بیشترین تکرار (MaxIt): ۵۰۰

شعاع اولیه برای جستجوی کلی (R_1): ۵

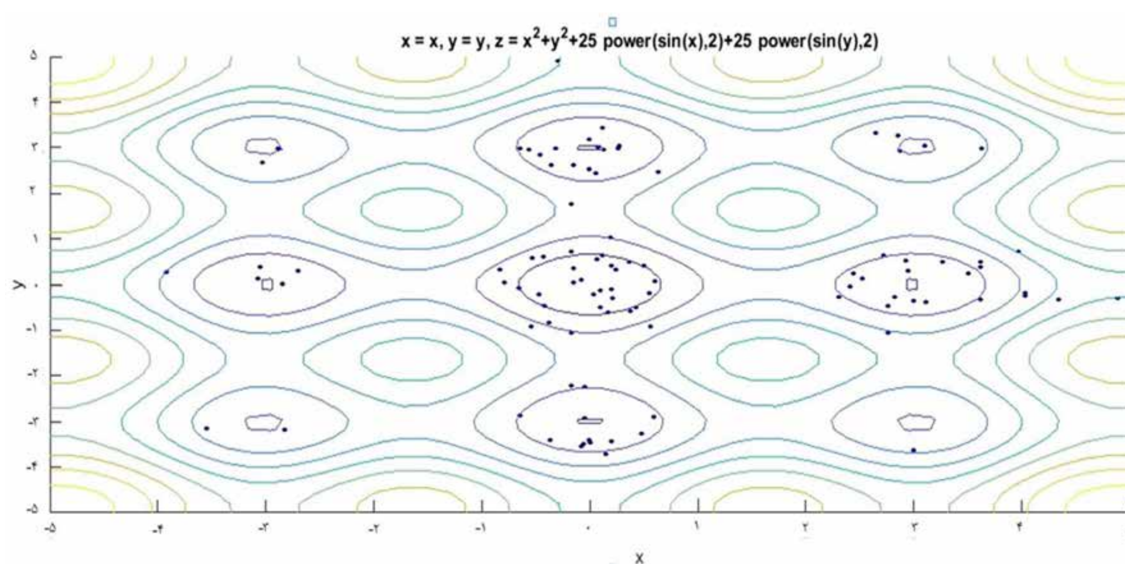
شعاع اولیه قطرات باران (R_2): ۰/۱

تعداد قطرات ایجاد شده به‌ازای هر قطره در جستجوی کلی (nCluster): ۲۰

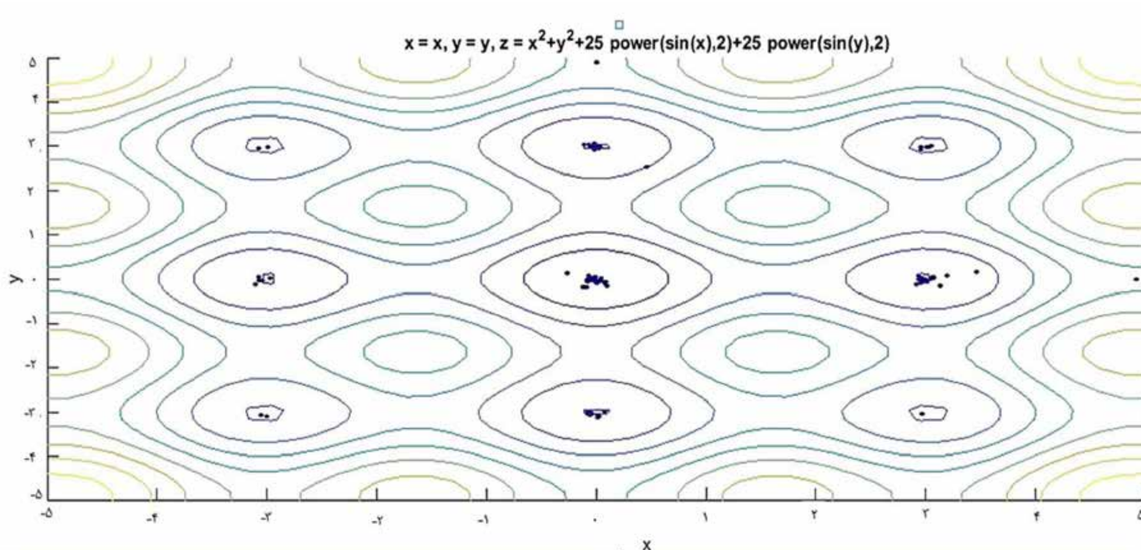
جمعیت اولیه ایجاد شده مطابق شکل ۷ روی فضای جستجوی پراکنده شده‌اند. پس از تنها یک بار انجام جستجوی کلی موقعیت اکثر نقاط بهبود یافته است و اکثر نقاط مطابق شکل ۸ به‌سمت نقاط کمترین حرکت کرده‌اند. در هر تکرار بعد از این‌که جستجوی کلی در فضای جستجو انجام شد، الگوریتم باران وارد عمل می‌شود. پس از اعمال الگوریتم باران روی نقاط در مرحله قبل و انجام جستجوی محلی موقعیت جمعیت اولیه در پایان تکرار اول به‌صورت شکل ۹ درخواهد آمد. بعد از ۱۰ تکرار الگوریتم موفق به پیدا کردن جواب مسأله شده است و مقدار خطای جواب به کمتر از 1e- رسیده است که این جواب با مقدار ارزیابی‌های انجام شده برای تابع هدف (NFE) برابر با ۲۴۰۲۸ به‌دست آمده است. وقتی همین مسأله با شرایط مشابه توسط الگوریتم باران حل شد، این الگوریتم موفق شد پس از ۴۹ تکرار و با مقدار NFE برابر با ۳۴۷۵۰ جواب مسأله را پیدا کند. این موضوع نشان می‌دهد که الگوریتم بهبود یافته باران از نظر تعداد تکرار حدود ۸۰٪ و از نظر NFE حدود ۳۰٪ نسبت به الگوریتم باران در حل این مسأله سریع‌تر عمل می‌کند. شکل ۱۰ چگونگی کاهش تابع هزینه به‌ازای تعداد ارزیابی های تابع هزینه (NFE) را نشان می‌دهد. هریک از خطوط عمودی خط چین نشان‌دهنده یک تکرار می‌باشد.



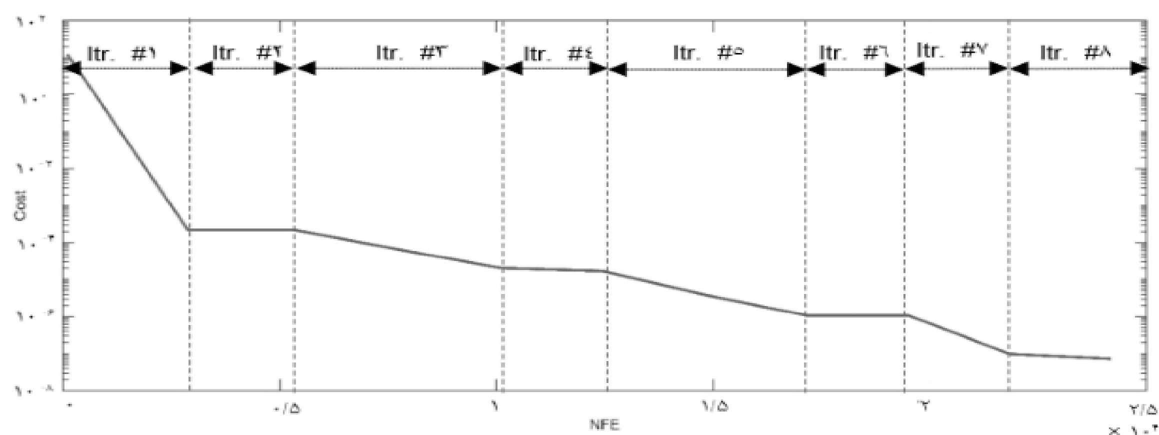
شکل ۷ موقعیت نقاط تصادفی اولیه انتخاب شده در روی فضای جستجو



شکل ۸ موقعیت نقاط تصادفی اولیه پس از تنها یک بار انجام جستجوی کلی (تا اینجا تنها نیمی از تکرار اول انجام شده است)



شـــکل ۹ موقعیـت نقـاط تصادفـی اولیـه پـس از تنهـا یـک تکـرار (تـا اینجـا تنهـا در یـک تکـرار جسـتجوی کلـی و جسـتجوی موضعـی انجام شـده اسـت)



شکل ۱۰ چگونگی کاهش تابع هزینه به‌ازای تعداد ارزیابی‌های تابع هزینه (NFE)

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۴۲-۲۴

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار بهترین جواب از ۱۲/۱۹۹۲ در ابتدای تکرار اول به 4-e ۲/۱۹۴ در انتهای تکرار اول رسیده است و در نهایت پس از ۸ تکرار بهترین جواب به‌دست آمده به 8-e ۷/۳۷۲۱ رسیده است. مقدار NFE در انتهای کار این الگوریتم برابر با ۲۴۰۲۸ بوده است. نکته مهم دیگر اینکه در هر تکرار تعداد NFE ممکن است با تکرارهای بعدی متفاوت باشد که همین امر نشان می‌دهد این الگوریتم به‌صورت هوشمند عمل می‌کند.

حل ۲۶ تابع معیار توسط الگوریتم بهینه یافته باران

در این قسمت ۲۶ تابع معیار مطابق با جدول ۲ جهت بررسی کارایی و عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی بهبود یافته باران IROA انتخاب شد و کارایی این الگوریتم نسبت به چند الگوریتم مهم دیگر مثل الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، الگوریتم خفاش (BA) و الگوریتم باران مقایسه شد. این توابع معیار قبلا توسط الگوریتم‌های ذکر شده توسط برخی از محققین حل شده‌اند و نتایج آن منتشر شده است [۱۴, ۱۶, ۲۵].

حل ۲۶ تابع معیار توسط الگوریتم بهینه یافته باران

در این قسمت ۲۶ تابع معیار مطابق با جدول ۲ جهت بررسی کارایی و عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی بهبود یافته باران IROA انتخاب شد و کارایی این الگوریتم نسبت به چند الگوریتم مهم دیگر مثل الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، الگوریتم خفاش (BA) و الگوریتم باران مقایسه شد. این توابع معیار قبلا توسط الگوریتم‌های ذکر شده توسط برخی از محققین حل شده‌اند و نتایج آن منتشر شده است [۱۴, ۱۶, ۲۵]. جهت حل این توابع با استفاده از الگوریتم‌های ذکر شده، تعداد تابع ارزیابی بالاتر از 5×10^{5} مجاز نیست. همچنین در حل این توابع هر عدد کمتر از 1×10^{-12} برابر با صفر فرض می‌شود. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، پیاده‌سازی کدها توسط نرم‌افزار متلب و با استفاده از یک لپ تاپ 8GHz انجام شد. تعداد جمعیت اولیه N_{pop} برای تمام الگوریتم‌ها برابر با ۵۰ در نظر گرفته شد. پارامترهای تنظیمی برای الگوریتم بهبود یافته باران و نیز بقیه الگوریتم‌های استفاده شده مطابق با جدول ۳ است. نتایج به‌دست آمده جهت حل توابع معیار توسط الگوریتم‌های یاد شده، در جدول ۳ آورده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، نمره و رتبه هر الگوریتم در دو ستون آخر جدول زیر آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که IROA, ROA, BA, PSO, GA به‌ترتیب بهترین عملکرد را در حل توابع معیار از خود نشان داده‌اند.

بررسی عملکرد IROA در حل یک مسأله شبیه‌سازی مربوط به تزریق دوغاب سیمان

بیان مسأله

امروزه به‌خاطر گسترش روز افزون نیاز به ساخت سازه‌های زیرزمینی، مشکلات و چالش‌های جدیدی در این زمینه ظهور و بروز یافته است که یکی از آن‌ها موضوع هجوم آب[1] به‌داخل تونل‌ها می‌باشد [۲۶]. مطالعات نشان می‌دهد مشکلات مهم و گوناگونی در اثر هجوم آب به‌داخل تونل‌ها می‌تواند ایجاد شود و به‌خاطر پیچیدگی و ناشناخته بودن این پدیده ممکن است حوادث دردناک و زیان‌های اقتصادی شدیدی به‌وجود آید. از طرف دیگر، ورودی آب به تونل‌ها می‌تواند باعث کاهش منابع آب زیرزمینی و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد نظر و نهایتاً کاهش ذخیره آب در یک منطقه شود [۲۷]. علاوه‌بر این در حالت‌های خیلی شدید مشکلات زمین‌شناسی مثل ریزش دیواره‌های تونل و ترک‌های سطحی[2] در روی زمین ممکن است مشاهده شود. یکی از جدیدترین روش‌هایی که امروزه برای جلوگیری از ورود آب به معدن استفاده می‌شود، عملیات تزریق[3] می‌باشد. در این راستا تلاش‌های قابل توجهی جهت بهبود شرایط و روش اجرا، مواد مورد استفاده و دستگاه‌های مورد نیاز انجام شده است.

1. Water Inrush
2. Fissure
3. Grouting

جدول ۲ توابع معیار استفاده شده در این تحقیق و مقدار کمترین مطلق هریک از آن‌ها [۲۵].

No	Name	Range	D	Formulation	Min
۱	Rastrigin	[-۱۲/۵,۱۲/۵]	n	$f_1(x)=10n+\sum_{i=1}^{n}[x_i^2-10\cos(2\pi x_i)]$	۰
۲	De Jong (Sphere)	[-۱۲/۵,۱۲/۵]	n	$f_2(x)=\sum_{i=1}^{n}x_i^2$	۰
۳	Griewank	[-۶۰۰,۶۰۰]	n	$f_3(x)=\frac{1}{4000}\sum_{i=1}^{n}x_i^2-\prod_{i=1}^{n}\cos(\frac{x_i}{\sqrt{i}})+1$	۰
۴	Beale	[-۵/۴,۵/۴]	۲	$f_4(x)=(1.5-x_1+x_1x_2)^2+(2.25-x_1+x_1x_2^2)^2+\ldots$ $\ldots(2.625-x_1+x_1x_2^3)^2$	۰
۵	Easom	[-۱۰۰,۱۰۰]	۲	$f_5(x)=-\cos(x_1)\cos(x_2)\exp(-(x_1-\pi)^2-(x_2-\pi)^2)$	-۱
۶	Matyas	[-۱۰,۱۰]	۲	$f_6(x)=0.26(x_1^2+x_2^2)-0.48x_1x_2$	۰
۷	Bo-hachevsky1	[-۱۰۰,۱۰۰]	۲	$f_7(x)=x_1^2+2x_2^2-0.3\cos(3\pi x_1)-0.4\cos(4\pi x_2)+0.7$	۰
۸	Booth	[-۱۰,۱۰]	۲	$f_8(x)=(x_1+2x_2-7)^2+(2x_1+x_2-5)^2$	۰
۹	Michalewicz2	[π ,۰]	۲	$f_9(x)=-\sum_{i=1}^{D}\sin(x_i)(\sin(ix_i^2/\pi))^{20}$	-۸۰۱۳/۱
۱۰	Schaffer	[-۱۰۰,۱۰۰]	۲	$f_{10}(x)=0.5+\frac{\sin^2(\sqrt{x_1^2+x_2^2})-0.5}{(1+0.001(x_1^2+x_2^2))^2}$	۰
۱۱	Six Hump Camel Back	[-۵,۵]	۲	$f_{10}(x)=4x_1^2-2.1x_1^4+\frac{1}{3}x_1^6+x_1x_2-4x_2^2+4x_2^4$	-۰۳۱۶۳/۱
۱۲	Boachevsky2	[-۱۰۰,۱۰۰]	۲	$f_{12}(x)=x_1^2+2x_2^2-0.3\cos(3\pi x_1)(4\pi x_2)+0.3$	۰
۱۳	Boachevsky3	[-۱۰۰,۱۰۰]	۲	$f_{13}(x)=x_1^2+2x_2^2-0.3\cos(3\pi x_1+4\pi x_2)+0.3$	۰
۱۴	Shubert	[-۱۰,۱۰]	۲	$f_{14}(x)=(\sum_{i=1}^{5}i\cos(i+1)x_1+i)(\sum_{i=1}^{5}i\cos((i+1)x_2+i))$	-۷۳/۱۸۶
۱۵	Colville	[-۱۰,۱۰]	۴	$f_{15}(x)=100(x_1^2-x_2)^2+(x_1-1)^2+(x_3-1)^2+90(x_3^2-x_4)^2+..$ $..10.1(x_2-1)^2+(x_4-1)^2+19.8(x_2-1)(x_4-1)$	۰
۱۶	Michalewicz5	[π ,۰]	۵	$f_{16}(x)=-\sum_{i=1}^{D}\sin(x_i)(\sin(ix_i^2/\pi))^{20}$	-۶۸۷۷/۴
۱۷	Zakharov	[-۵,۱۰]	۱۰	$f_{17}(x)=\sum_{i=1}^{D}x_i^2+(\sum_{i=1}^{D}0.5ix_i^2)^2+(\sum_{i=1}^{D}0.5ix_i^2)^4$	۰
۱۸	Michale-wicz10	[π ,۰]	۱۰	$f_{18}(x)=-\sum_{i=1}^{D}\sin(x_i)(\sin(ix_i^2/\pi))^{20}$	-۶۶۰۲/۹
۱۹	Step	[-۱۲/۵,۱۲/۵]	۳۰	$f_{19}(x)=\sum_{i=1}^{D}(x_i+0.5)^2$	۰
۲۰	SumSquares	[-۱۰,۱۰]	۳۰	$f_{20}(x)=\sum_{i=1}^{D}ix_i^2$	۰

ادامه جدول ۲

۲۱	Quartic	[۱,۲۸,۱,۲۸–]	۳۰	$f_{21}(x)=\sum_{i=1}^{D} i x_i^4 + Rand$	۰
۲۲	Schwefel 2.22	[۱۰,۱۰–]	۳۰	$f_{22}(x)=\sum_{i=1}^{D}\lvert x_i\rvert+\prod_{i=1}^{D}\lvert x_i\rvert$	۰
۲۳	Schwefel 1.2	[۱۰۰,۱۰۰–]	۳۰	$f_{23}(x)=\sum_{i=1}^{D}(\sum_{j=1}^{D} x_j)^2$	۰
۲۴	Rosenbrock	[۳۰,۳۰–]	۳۰	$f_{24}(x)=\sum_{i=1}^{D}100(x_{i+1}-x_i^2)^2+(x_i-1)^2$	۰
۲۵	Dixon-Price	[۱۰,۱۰–]	۳۰	$f_{25}(x)=(x_1-1)^2+\sum_{i=2}^{D} i(2x_i^2-x_i-1)^2$	۰
۲۶	Ackley	[۳۲,۳۲–]	۳۰	$f_{26}(x)=-20\exp(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{D}x_i^2})-\exp(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{D}\cos(2\pi x_i))+20+e$	۰

جدول ۳ مقایسه عملکرد الگوریتم‌های گوناگون روی توابع معیار مختلف

f	D	Min		GA	PSO	BA	ROA	IROA
$f_1(x)$	۳۰	۰	Mean	۵۲/۹۲۲۵۹ (۳)	۴۳/۹۷۷۱۳۶۹ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۴/۵۶۴۸۶	۱۱/۱۱۷۲۸۶۷۶	۰	۰	۰
$f_2(x)$	۳۰	۰	Mean	(۲)۳+۱E/۱۱	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۷۴/۲۱۴۴۷	۰	۰	۰	۰
$f_3(x)$	۳۰	۰	Mean	۱۰/۶۳۳۴۶ (۳)	۰/۰۱۷۳۹ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۱/۱۶۱۴۶	۰/۰۲۰۸۱	۰	۰	۰
$f_4(x)$	۲	۰	Mean	۰ (۱)	۰ (۱)	۱/۸۸ E-۰۵ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰	۰	۹۴/۱ E-۰۵	۰	۰
$f_5(x)$	۲	۱-	Mean	۱- (۱)	۱- (۱)	۰/۹۹۹۹۴- (۲)	۱- (۱)	۱- (۱)
			SD	۰	۰	۴/۵۰ E- ۰۵	۰	۰
$f_6(x)$	۲	۰	Mean	۰ (۱)	۰ (۱)	(۱) ۰	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰	۰	۰	۰	۰
$f_7(x)$	۲	۰	Mean	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰	۰	۰	۰	۰
$f_8(x)$	۲	۰	Mean	۰ (۱)	۰ (۱)	۰/۰۰۰۵۳ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰	۰	۰/۰۰۰۷۴	۰	۰
$f_9(x)$	۲	۱/۸۰۱۳-	Mean	۱/۸۰۱۳- (۱)	۱/۵۷۲۸۷- (۲)	۱/۸۰۱۳- (۱)	۱/۸۰۱۳- (۱)	۱/۸۰۱۳-
			SD	۰	۰/۱۱۹۸۶	۰	۰	۰

ادامه جدول ۳

$f_{10}(x)$	۲	۰	Mean	۰/۰۰۴۲۴ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰/۰۰۰۴۷۶	۰	۰	۰	۰
$f_{11}(x)$	۲	-۱/۰۳۱۶	Mean	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶
			SD	۰	۰	۰	۰	۰
$f_{12}(x)$	۲	۰	Mean	۰/۰۶۸۲۹ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰/۰۷۸۲۲	۰	۰	۰	۰
$f_{13}(x)$	۲	۰	Mean	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰	۰	۰	۰	۰
$f_{14}(x)$	۲	-۱۸۶/۷۳	Mean	-۱۸۶/۷۳ (۱)	-۱۸۶/۷۳ (۱)	-۱۸۶/۷۳ (۱)	-۱۸۶/۷۳ (۱)	-۱۸۶/۷۳(۱)
			SD	۰	۰	۰	۰	۰
$f_{15}(x)$	۴	۰	Mean	۰/۰۱۴۹۴ (۴)	۰ (۱)	۱/۱۱۷۶ (۵)	۰/۰۰۰۵۳ (۲)	۰/۰۰۰۵۳(۲)
			SD	۰/۰۰۷۳۶	۰	۰/۴۶۶۲۳	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۳۲
$f_{16}(x)$	۵	-۴/۶۸۷۷	Mean	-۴/۶۴۴۸۳ (۲)	-۲/۴۹۰۸۷ (۳)	-۴/۶۸۷۷ (۱)	-۴/۶۸۷۷ (۱)	-۴/۶۸۷۷(۱)
			SD	۰/۰۰۹۷۸۵	۰/۰۲۵۶۹۵	۰	۰	۰
$f_{17}(x)$	۱۰	۰	Mean	۰/۰۱۳۳۶ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰/۰۰۴۵۳	۰	۰	۰	۰
$f_{18}(x)$	۱۰	-۹/۶۶۰۲	Mean	-۹/۶۶۰۲ (۳)	-۴/۰۰۷۱۸ (۴)	-۹/۶۶۰۲ (۱)	-۹/۶۶۰۲ (۱)	-۹/۶۶۰۲ (۱)
			SD	۰/۱۴۱۱۲	۰/۰۵۰۲۶۳	۰	۰	۰
$f_{19}(x)$	۳۰	۰	Mean	۱/۱۷ E+۰۳ (۳)	۰ (۱)	۵/۱۲۳۷ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۷۶/۵۶۱۴۵	۰	۰/۰۳۹۲۰۹	۰	۰
$f_{20}(x)$	۳۰	۰	Mean	۴۸/۱ E+۰۲ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۱۲/۴۰۹۲۹	۰	۰	۰	۰
$f_{21}(x)$	۳۰	۰	Mean	۰/۱۸۰۷ (۴)	۰/۰۰۱۱۶ (۳)	۱/۷۲ E-۰۶ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰/۰۲۷۱۲	۰/۰۰۰۲۸	۱/۵۸ E-۰۶	۰	۰
$f_{22}(x)$	۳۰	۰	Mean	۱۱/۰۲۱۴ (۳)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۱/۳۸۶۸۶	۰	۰	۰	۰
$f_{23}(x)$	۳۰	۰	Mean	۷/۴۰ E +۰۳ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۱/۱۴ E+۰۳	۰	۰	۰	۰
$f_{24}(x)$	۳۰	۰	Mean	۱/۹۶ E +۰۵ (۵)	۱۵/۰۸۸۶۱۷ (۳)	۲۸/۸۳۴ (۴)	۹/۴۵۳۶ (۲)	۵/۲۳۲۱ (۱)
			SD	۳/۸۵ E+۰۴	۲۴/۱۷۰۱۹۶	۰/۱۰۵۹۷	۳/۴۳۸۱	۲/۵۶۴
$f_{25}(x)$	۳۰	۰	Mean	۲۲/۱ E +۰۳ (۳)	۰/۶۶۶۶۷ (۲)	۰/۶۶۶۶۷ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰۲+E ۲/۶۶	E-۰۸	۱/۱۶ E-۰۹	۰	۰
$f_{26}(x)$	۳۰	۰	Mean	۱۴/۶۷۱۷۸ (۳)	۰/۱۶۴۶۲ (۲)	۰ (۱)	۰ (۱)	۰ (۱)
			SD	۰/۱۷۸۱۴	۰/۴۹۳۸۷	۰	۰	۰
Score				۴۸	۳۶	۳۵	۲۸	۲۷
Rank Final				۵	۴	۳	۲	۱

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۴۲-۲۴

یکی از نکاتی که می‌تواند دارای اهمیت ویژه‌ای باشد، این موضوع است که سیال تزریق شده به‌داخل شکاف‌ها، جهت جلوگیری از ورود آب به‌داخل تونل، قادر است تا چه فاصله‌ای حرکت کند. البته این مسأله وابستگی زیادی به دبی سیال تزریقی و نیز نوع سیال تزریقی به‌داخل شکاف دارد. در ادامه با استفاده از الگوریتم IROA به حل این مسأله پیچیده پرداخته خواهد شد.

اصول شبیه‌سازی حرکت سیال در محیط متخلخل و شکاف

شبیه‌سازی حرکت سیال در یک محیط متخلخل و به‌صورت مشابه یک شکاف با ترکیب سه رابطه مهم یعنی رابطه بقای جرم، رابطه حرکت سیال در محیط متخلخل و نیز رابطه حالت قابل انجام می‌باشد. سیال مورد استفاده جهت تزریق در یک شکاف یک جریان تک فاز از یک سیال تراکم‌ناپذیر می‌باشد که ویسکوزیته این سیال نسبت به زمان متغیر می‌باشد.

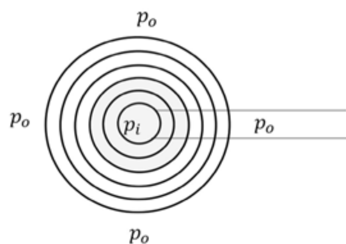
شبیه‌سازی یک شکاف

برای شبیه‌سازی حرکت یک سیال تراکم‌ناپذیر در یک شکاف دو حالت مختلف را می‌توان در نظر گرفت:

۱- حالتی که دیواره‌های دو طرف شکاف دارای تراوایی صفر باشند و سیال نتواند وارد ماتریکس اطراف شکاف شود.

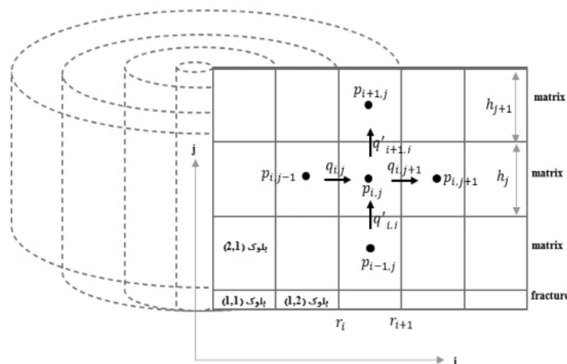
۲- حالتی که دیواره‌های دو طرف شکاف یک محیط متخلخل و دارای تراوایی مشخص باشد و سیال تزریق وارد دیواره‌ها شود.

شبیه‌سازی اول در واقع یک حالت خاص از شبیه‌سازی کلی‌تر دوم است و برای جامع‌تر بودن شبیه‌سازی، در ادامه این حالت بحث خواهد شد. شکل ۱۱ نمای یک شکاف را وقتی سیال از یک گمانه به‌داخل آن تزریق می‌شود از بالا نشان می‌دهد: سیال با حرکت به‌داخل شکاف به‌صورت شعاعی در شکاف حرکت می‌کند و به پیش می‌رود.



شکل ۱۱ شکل یک شکاف وقتی یک گمانه در جهت عمود بر آن حفر شود و حرکت شعاعی سیال تزریقی به‌داخل شکاف

هر یک از دوایر یک بلوک را نشان می‌دهد که در طول شبیه‌سازی باید مشخصات آن را به‌صورت دقیق تعیین کرد. اگر نمای عمودی برش نشان داده شده در شکل ۱۲ را نگاه کنیم، بلوک‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی بهتر مشخص می‌شوند:



شکل ۱۲ بلوک بندی مورد استفاده در شبیه‌سازی یک شکاف و ماتریس اطراف آن که هریک از بلوک‌ها به‌صورت پوسته‌های استوانه‌ای تو در تو خواهند بود

همان‌گونه که در مقطع عمودی شکل ۱۲ دیده می‌شود، منطقه شبیه‌سازی به تعدادی بلوک تقسیم شده است که بلوک‌ها در i ردیف و j ستون جای داده شده‌اند. هر بلوک به شکل پوسته‌ای از استوانه است و سیال می‌تواند به‌صورت افقی و عمودی بین بلوک‌ها جابه‌جا شود. حرکت افقی سیال تحت مدل شعاعی و حرکت عمودی سیال تحت مدل خطی انجام می‌شود. به مرکز هر بلوک یک فشار تخصیص داده شده است که برای بلوک سطر i و ستون j با $p_{i,j}$ نشان داده می‌شود.

از طرف دیگر سیال ورودی به یک بلوک در جهت عمودی با $q_{i,j}$ و سیال خروجی از یک بلوک در جهت عمودی با q'_{i+1j} نشان داده می‌شود. جهت سادگی در شبیه‌سازی یک طرف شکاف را ناتراوا فرض می‌کنیم و تراوایی طرف دوم را دو برابر در نظر می‌گیریم. مشخصات هر بلوک از جمله ارتفاع بلوک، شعاع داخلی بلوک، شعاع خارجی بلوک، تراوایی عمودی بلوک، تراوایی شعاعی بلوک و ویسکوزیته سیال داخل هر بلوک از قبل مشخص است و هر یک توسط یک ماتریس دو بعدی i در j ذخیره می‌شود. نکته خیلی مهم در این شبیه‌سازی این است که ویسکوزیته سیال تزریقی تابعی از زمان است و با گذشت زمان بیشتر می‌شود.

برای یک بلوک مشخص (i,j) داریم:

$$q_{i,j} = q_{i+1,j} + q'_{i,j} - q'_{i,j+1} = 0 \qquad (۸)$$

این شرط باید برای تمامی بلوک‌ها بررسی شود و با حل همزمان دستگاه روابط به‌دست آمده برای تمامی بلوک‌ها می‌توان فشار را در هر بلوک محاسبه کرد. برای مثال برای حل شبیه‌سازی یک شکاف با تعداد بلوک‌های n×n باید دستگاه روابط زیر حل شود:

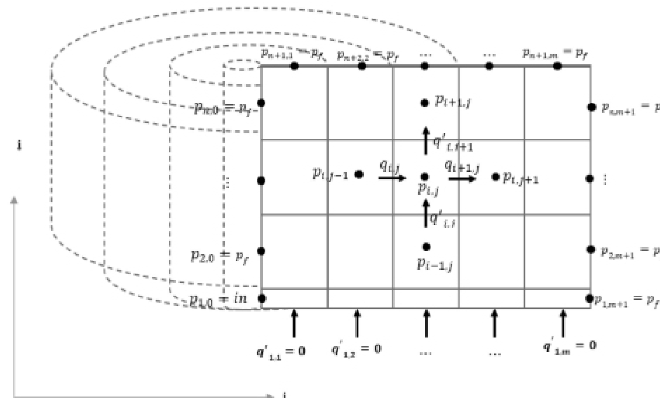
$$\begin{cases} q_{1,1} - q_{2,1} + q'_{1,1} - q'_{1,2} = 0 \\ q_{1,2} - q_{2,2} + q'_{1,2} - q'_{1,3} = 0 \\ \vdots \\ q_{i,j} - q_{i+1,j} + q'_{i,j} - q'_{i,j+1} = 0 \\ \vdots \\ q_{n,n} - q_{n+1,n} + q'_{n,n} - q'_{n,n+1} = 0 \end{cases} \qquad (۹)$$

شرایط مرزی

شرایط مرزی تاثیر زیادی در حل مسأله فوق دارد. در این کار فرض بر این است که یک گمانه به‌صورت عمودی از یک شکاف عبور کرده است و تا حد مورد نیاز به سنگ اطراف شکاف نفوذ کرده است. بنابراین فشار سیال وردی به شکاف و ماتریکس برابر است با pin که مقدار آن به فشار تزریق پمپ مورد استفاده بستگی دارد و البته حد بالایی آن به فشار شکست در سنگ دیواره معدن بستگی دارد. با توجه به اینکه شکاف را از یک طرف شبیه‌سازی نمودیم، دبی ورودی از سمت ماتریس به‌داخل شکاف از یک طرف صفر در نظر گرفته می‌شود (در شکل زیر دبی ورودی از پایین به‌داخل شکاف صفر در نظر گرفته شده است). فشار در دوطرف دیگر مدل برابر با فشار آب موجود در سازند می‌باشد. شکل ۱۳ شرایط مرزی حل مسأله را بهتر نشان می‌دهد:

محاسبه فشار در هر بلوک

همان‌گونه که قبلا گفته شد، برای محاسبه فشار در هر بلوک با در نظر گرفته شرایط مرزی و با حل دستگاه روابط داده شده در قسمت قبل می‌توان فشار در هر بلوک را محاسبه نمود. برای حل دستگاه روابط در این کار سعی می‌کنیم از یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری جدید به نام الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی باران استفاده نماییم.



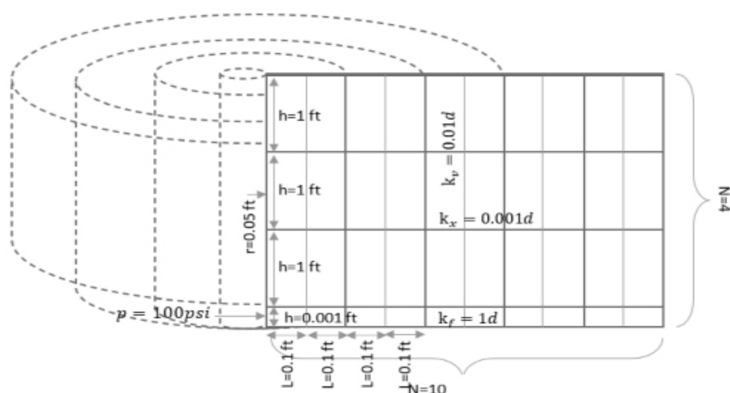
شکل ۱۳ شرایط مرزی برای حل مسأله شبیه‌سازی

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۴۲-۲۴

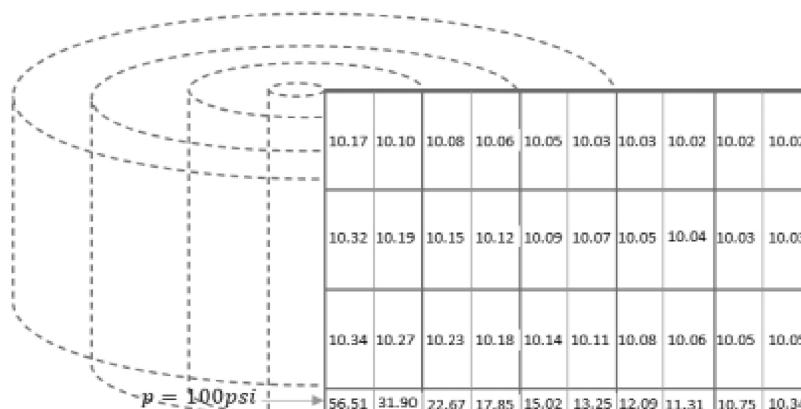
در ایـن روش بـا حـدس زدن فشـار در هـر بلـوک و بررسـی شـرط مجمـوع دبـی برابـر بـا صفـر در هـر بلـوک مقـدار فشـار بلـوک را بهدسـت آوریـم.

بحث

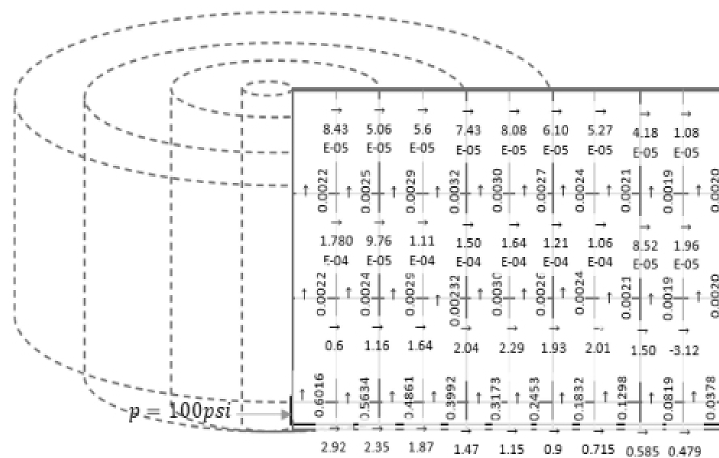
جهـت انجـام شبیهسـازی در اینکار، از یـک شـبکهبندی ۱۰ در ۴ اسـتفاده شـد بهطوریکـه تعـداد بلوکهـای اسـتوانهای تـو در تـو ۱۰ عـدد بـود و هـر اسـتوانه خـود بـه ۴ بلـوک تقسـیم شـد. قطـر شـکاف برابـر بـا ۰/۰۰۱ ft و ارتفـاع بلوکهـای عمـودی برابـر بـا یـک فـوت انتخـاب گردیـد. همچنیـن ضخامـت هـر بلـوک اسـتوانهای برابـر با ۰/۱ ft در نظـر گرفتـه شـد. در ایـن مـدل تراوایـی شـکاف برابـر بـا ۱۰ دارسـی و تراوایـی افقـی و عمـودی هـر بلـوک بهترتیـب ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ D در نظـر گرفتـه شـد. از طـرف دیگـر فشـار سـیال تزریقـی بهداخـل شـکاف برابـر بـا ۱۰۰ psi و فشـار اولیـه آب موجـود در بلوکهـا قبـل از تزریـق برابـر بـا ۱۰ psi در نظـر گرفتـه شـد. شـکل ۱۴ ایـن سـایزبندی را بهتـر نشـان میدهـد. جهـت سـاده سـازی ایـن مـدل تراوایـی یـک طـرف شـکاف (پاییـن شـکاف) برابـر بـا صفـر و تراوایـی عمـودی بلوکهـا دو برابـر در نظـر گرفتـه شـد. مـدل ایجـاد شـده در ایـن کار بـا اسـتفاده از الگوریتـم بهینهسـازی بـاران حـل شـد و فشـار در مرکـز هـر بلـوک محاسـبه شـد. بـرای ایـن کار ویسـکوزیته سـیال ۱ cp در نظـر گرفتـه شـد. مـدل ایجـاد شـده در ایـن کار بـا اسـتفاده از الگوریتـم بهینهسـازی بـاران حـل شـد و فشـار در مرکـز هـر بلـوک محاسـبه شـد. بـرای ایـن کار ویسـکوزیته سـیال ۱ cp در نظـر گرفتـه شـد. فشـار بهدسـت آمـده در هـر بلـوک پـس از ۱۰۰ تکـرار توسـط الگوریتـم بـاران و بـا انتخـاب جمعیـت اولیـه برابـر بـا ۵۰ در شـکل ۱۵ دیـده میشـود. دبـی افقـی و دبـی عمـودی در بیـن بلوکهـا در شـکل ۱۶ داده شـده اسـت.



شکل ۱۴ خصوصیات هندسی و ژئوفیزیکی مدل ایجاد شده جهت انجام شبیهسازی



شکل ۱۵ فشار بهدست آمده در هر بلوک هنگامیکه سیالی با ویسکوزیته ۱ cp و فشار ۱۰۰ psi بهداخل شکاف تزریق میگردد



شکل ۱۶ دبی افقی و عمودی بین بلوک‌ها هنگامی‌که سیالی با ویسکوزیته ۱ cp و فشار ۱۰۰ psi به‌داخل شکاف تزریق می‌گردد

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک الگوریتم فراابتکاری جدید به نام الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی باران که از پدیده بارندگی الهام گرفته شده بود، معرفی گردید. این الگوریتم در واقع یک ویرایش جدید از الگوریتم باران است و با ایجاد تغییراتی در این الگوریتم به وجود آمد. این الگوریتم برای حل چندین تابع معیار گوناگون و یک مسأله شبیه‌سازی در حوزه مهندسی معدن استفاده شد. همچنین عملکرد این الگوریتم با الگوریتم‌های دیگر مثل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم خفاش و نیز الگوریتم باران مقایسه شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

الگوریتم بهینه‌سازی بهبود یافته باران دارای سرعت بسیار بالاتری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی باران می‌باشد و قادر است با تعداد تکرارهای کمتر و نیز تعداد ارزیابی‌های کمتر تابع هدف به جواب مسأله برسد. در همین راستا جهت حل تابع معیار Eggcrete، الگوریتم بهبود یافته باران از نظر تعداد تکرار حدود ۸۰٪ و از نظر NFE حدود ۳۰٪ نسبت به الگوریتم باران در حل این مسأله سریع‌تر عمل کرد. الگوریتم بهبود یافته باران، در حل توابع معیار پیچیده قادر بود عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم خفاش و نیز الگوریتم باران داشته باشد. الگوریتم بهبود یافته باران برای حل یک مسأله شبیه‌سازی پیچیده در حوزه مهندسی معدن استفاده شد و قادر بود با دقتی بسیار بالا و با سرعت خوب جواب مسأله را پیدا کند.

مراجع

[1]. Dokeroglu, T., Sevinc, E., Kucukyilmaz, T., & Cosar, A. (2019). A survey on new generation metaheuristic algorithms, Computers & Industrial Engineering, 137, 106040, 2019/11/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106040.

[2]. Magnusson, J., & Nilsson, J. (2018). Project matching application framework using metaheuristic algorithms, 1st edition, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1-83.

[۳]. شکیبا س. و دولتی ارده‌جانی ف. (۲۰۲۳). استفاده از روش‌های بهینه‌یابی فراابتکاری جستجوی گرانشی، ازدحام ذرات و ترکیب آن‌ها در مدل‌سازی شبکه شکستگی، پژوهش نفت، ۳۳(۱۴۰۲-۱): ۱۰۷-۱۰۰، doi: 10.22078/pr.2022.4960.3210.

[4]. Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, Optimization, and MachineLearning, doi.org/10.11517/jjsai.7.1_168.

[5]. Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimi zation over continuous spaces, journal of global optimization, 11(4): 341-359, 1997/12/01 1997, doi: 10.1023/A:1008202821328.
[6]. Banzhaf, W., Nordin, P., Keller, R. E., & Francone, F. D. (1998). Genetic programming: an introduction, Morgan Kaufmann Publishers San Francisco.
[7]. F. Glover and M. Laguna, (1998). Tabu Search, in Handbook of Combinatorial Optimization, 1–3, D.-Z. Du and P. M. Pardalos Eds. Boston, MA: Springer US, 2093-2229.
[8]. Marques-Silva, J. P., & Sakallah, K. A. (1999). A search algorithm for propositional satisfiability, IEEE Transactions on Computers, 48(5): 506-521, 1999, doi: 10.1109/12.769433.
[9]. Lourenço, H. R., Martin, O. C., & Stützle, T. (2003). Iterated Local Search, in Handbook of Metaheuristics, F. Glover and G. A. Kochenberger Eds. Boston, MA: Springer US, 320-353.
[10]. Eusuff, M. M., & Lansey, K. E. (2003). Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm, Journal of Water Resources planning and management, 129(3): 210-225, doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(21.
[11]. Wei, Y., & Qiqiang, L. (2004). Survey on particle swarm optimization algorithm, Engineering Science, 5(5): 87-94.
[12]. Martí, R., Laguna, M., & Glover, F. (2006). Principles of scatter search, European Journal of Operational Research, 169(2): 359-372, doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.08.004.
[13]. Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization, IEEE computational intelligence magazine, 1(4): 28-39, doi: 10.1109/MCI.2006.329691.
[14]. Moazzeni, A. R., & Khamehchi, E. (2020). Rain optimization algorithm (ROA): A new metaheuristic method for drilling optimization solutions, Journal of Petroleum Science and Engineering, 195, 107512, doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107512.
[15]. Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm, Advances in Engineering Software, 95, 51-67, doi: https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.
[16]. Cheng, M. Y., & Prayogo, D. (2014). Symbiotic organisms search: A new metaheuristic optimization algorithm, Computers & Structures, 139, 98-112, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007.
[17]. Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer, Advances in Engineering Software, 69, 46-61, doi: https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
[18]. Cuevas, E., Cienfuegos, M., Zaldívar, D., & Pérez-Cisneros, M. (2013). A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider, Expert Systems with Applications, 40, (16): doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.041.
[19]. Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems, Computer-Aided Design, 43(3): 303-315, doi: https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015.
[20]. Yang, X. S. (2010). Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation, International journal of bio-inspired computation, 2, (2): 78-84, doi.org/10.1504/IJBIC.2010.032124.
[21]. Yang, X. S. (2010). A new metaheuristic bat-inspired algorithm, in nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO), Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 65-74.
[22]. Das, S., Biswas, A., Dasgupta, S., & Abraham, A. (2009). Bacterial foraging optimization algorithm: theoretical foundations, analysis, and applications, in foundations of computational intelligence, 3, Global Optimization, A. Abraham, A.-E. Hassanien, P. Siarry, and A. Engelbrecht Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 23-55.
[23]. Simon, D. (2008). Biogeography-based optimization, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 12, (6): 702-713, doi: 10.1109/TEVC.2008.919004.
[24]. Karaboga, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Citeseer, Technical Report-tr06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.
[25]. Ebrahimi, A., & Khamehchi, E. (2016). Sperm whale algorithm: an effective metaheuristic algorithm for production optimization problems, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 29, 211-222, doi.org/10.1016/j.jngse.2016.01.001.
[26]. Ge, J. (2006). Development and prospect of chemical grouting techniques, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(3): 384-3.
[27]. Li, S., Liu, R., Zhang, Q., & Zhang, X. (2016). Protection against water or mud inrush in tunnels by grouting: a review, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(5): 753-766, doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.002.

بررسی روش‌های حرارت‌دهی بر روی مقدار و کیفیت نفت تولیدی از نمونه شیل نفتی ایران

حسن نادری[1]، علی شکاری فرد[2]* و جابر طاهری شکیب[1]

۱- پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- انسیتو نفت، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

چکیده

افزایش استحصال و ارتقاء کیفیت نفت تولیدی یکی از موضوعات بسیار مهم و چالش برانگیز در بهره‌برداری از شیل‌های نفتی می‌باشد. در این مطالعه به بررسی و ارزیابی نرخ حرارت‌دهی با استفاده از امواج مایکروویو و حرارت‌دهی معمولی برروی مقدار و کیفیت نفت-شیل تولیدی از مخزن قالی کوه ایران پرداخته شده است. بدین منظور چند نمونه شیل نفتی با استفاده از فیشر توسعه یافته با امواج مایکروویو در بسامد 2450 kH، تحت حرارت‌دهی در توان‌های ۶۵۰، ۹۰۰ و W ۱۲۰۰ تا دمای نهایی C° ۷۰۰ (دمای کک شدگی) قرار گرفت. مقدار و ترکیبات نفت-شیل‌های تولید شده با امواج مایکروویو مورد بررسی واقع شدند و در ادامه نتایج با مقادیر استحصالی از روش حرارت‌دهی معمولی مقایسه گردیدند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد نفت تولید شده در فرایند حرارت‌دهی با استفاده از امواج مایکروویو در تمامی نرخ‌های حرارتی بیش از حرارت‌دهی معمولی است. در حرارت‌دهی معمولی با افزایش نرخ حرارت‌دهی میزان نفت تولید شده کاهش یافته است، ولی در حرارت‌دهی با امواج مایکروویو روندی افزایش و کاهشی دارد. در نفت تولیدی با امواج مایکروویو، با افزایش نرخ حرارت‌دهی ترکیبات آسفالتین کاهش و ترکیبات اشباع افزایش می‌یابد. در حرارت‌دهی معمولی با افزایش نرخ حرارت‌دهی ترکیبات اشباع و آسفالتین کاهش و ترکیبات رزین افزایش می‌یابد. مقادیر ترکیبات آروماتیکی نیز دارای نوسان است. در نفت-شیل‌های تولیدی با استفاده از امواج مایکروویو بیشترین گوگردزدایی مشاهده می‌شود، در حرارت‌دهی معمولی با افزایش نرخ حرارت‌دهی مقادیر سولفور و نیتروژن، کاهش و اکسیژن افزایش یافته است. براساس نتایج حاصل از طیف روش تبدیل فوریه مادون قرمز FTIR نفت-شیل‌های تولیدی، با افزایش نرخ حرارت‌دهی در هنگام استفاده از امواج مایکروویو علاوه بر حضور ترکیبات هیدروکسیلی، افزایش ترکیبات آلیفاتیکی نیز مشاهده می‌گردد. اما در حرارت‌دهی معمولی چنین پدیده‌ای مشاهده نگردید. استفاده از فن‌آوری مایکروویو نه تنها سبب افزایش بازدهی تولید نفت از نمونه شیل‌های نفتی می‌گردد، بلکه ارتقاء کیفیت آن را نیز به دنبال دارد.

کلمات کلیدی: شیل نفتی، مایکروویو، پیرولیز، نفت شیل، ارتقاء کیفیت ، قالی کوه لرستان.

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی ashekary@ut.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.4951.3206)

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۵۷-۴۳

مقدمه

مخازن نامتعارف هیدروکربنی قسمت اعظمی از ذخایر نفت و گاز جهان را تشکیل می‌دهند که مخازن شیل- نفتی از مهمترین آنها محسوب می‌باشند. شیل‌های نفتی سنگ‌های رسوبی غنی از کروژن هستند که نابالغ بوده و به سنگ منشاء شناخته می‌شوند. هیدروکربور موجود در این سنگ‌ها تحت فشار و دمای زمین طی سال‌ها به نفت بالغ تبدیل می‌شوند و به مخازن تولیدی مهاجرت می‌نمایند. امروزه سنگ‌های منشاء طی فرآیند حرارت‌دهی قادر به تولید نفت-شیل[1] می‌باشند. در واقع، شیل‌های‌نفتی سنگ‌های رسوبی ریز دانه غنی از ماده آلی می‌باشند که با بهره‌گیری از فناوری‌های پیرولیز، هیدروژناسیون[2] و انحلال حرارتی[3] امکان استخراج نفت از این منابع حاصل می‌گردد [۱]. پیش‌بینی شده که نفت تولیدی از این منابع بیش از چهار برابر ذخایر نفت ثابت شده در جهان باشد [۲]. صرف‌نظر از فرایندهای تولید نفت-شیل، خواص نفت شیل به دلایل متعدد از جمله گرانروی بالا، مقادیر بالای ناخالصی نظیر گوگرد، نیتروژن، اکسیژن، فلزات سنگین و درصد بالای ترکیبات آسفالتین، تقریباً در اکثر مواقع از کیفیت پایینی برخوردار است. نه تنها استحصال و انتقال آنها بسیار سخت و پیچیده است، بلکه قیمت آن در بازارهای جهانی نیز به مراتب کمتر از نفت خام سبک است [۳].

مطالعه ترکیبات و اجزاء مختلف شیمیایی نفت-شیل یک گام مهم و اساسی در فرایند ارتقاء کیفیت نفت-شیل می‌باشد. ارزیابی کاربرد بالقوه این نفت-شیل‌ها برای اهداف مختلف بسیار حائز اهمیت است. اما دشوارترین مانع استفاده از شیل‌های نفتی، فرآیند تولید نفت از شیل‌های نفتی است، که به مقدار زیادی انرژی نیازمند است [۴]. علاوه براین، انتقال حرارت دقیق و شرایط حرارت‌دهی برای رسیدن به بالاترین بازدهی و کیفیت نفت شیل حائز اهمیت می‌باشد. خاکستر و گاز نیز در اثر شکست حرارتی شیل نفتی به همراه نفت تولید می‌شوند [۵]. با استفاده از عملیات حرارتی شیل‌های نفتی می‌توان تعدادی محصولات نفتی مفید به‌منظور سوخت وسایل حمل و نقل و صنایع پتروشیمی تولید نمود. از محصولات گازی به‌دست آمده نیز پس از گوگردزدایی[4] و هیدروژناسیون می‌توان به عنوان سوخت برای گرم کردن استفاده کرد [۶]. در سال‌های اخیر، روش‌های پیرولیز جدید به‌منظور تولید نفت از شیل‌های نفتی ارائه شده است [۷]. ژو و همکاران نشان دادند که در صورتی که در نمونه شیل نفتی، نسبت آب/شیل نفتی معادل ۳ باشد، در این صورت در دمای ۳۶۵ می‌توان بیشترین مقدار نفت-شیل را استخراج نمود که این مقدار در درصدهای مختلف متفاوت می‌باشد. این در حالی است که براساس آزمایشات صورت گرفته توسط ژو و همکاران، نفت-شیل زمانی تولید می‌گردد که دما به بالاتر از ۴۸۶ °C-۳۶۶ برسد. حرارت‌دهی با امواج مایکروویو نسبت به حرارت‌دهی معمولی دارای مزایایی نظیر صرفه‌جویی در انرژی، زمان، حرارت‌دهی یکنواخت و همچنین حرارت‌دهی انتخابی می‌باشد که طی آن برخی مواد را بیشتر تحت‌تأثیر قرار می‌دهند [۸]. پیرولیز شیل‌های نفتی با استفاده از امواج مایکروویو به شدت زمان واکنش را کم نموده و باعث افزایش قابل توجه بهره‌وری انرژی می‌شود [۹]. بهره‌گیری از فنآوری امواج الکترومغناطیس در صنعت نفت در چند سال اخیر بسیار توسعه یافته و بسیاری از شرکت‌های مطرح دنیا درصدد استفاده از این فن‌آوری می‌باشند [۱۰]. تغییراتی که تابش مایکروویو در خواص دی الکتریک شیل‌های نفتی به‌وجود می‌آورد کاملاً متفاوت از حرارت‌دهی معمولی می‌باشد که می‌تواند به دلیل سینیتیک

1. Shale Oil
2. Hydrogenation
3. Thermal Dissolution
4. Desulphurization

شـیمیایی رقابتـی[1] متفـاوت در دو فراینـد باشـد [۱۱]. از طرفـی مایکروویـو سـبب بهبـود آسـیاب‌پذیری[2] شـیل‌های نفتـی می‌گـردد کـه می‌توانـد به‌دلیـل تغییـرات ماتریکـس شـیل نفتـی یـا تغییـرات فـاز رطوبتـی در داخـل سـاختار شـیل نفتـی باشـد [۱۲]. فیزیـک ایـن مسـئله اکثـراً مربـوط بـه توانایی جـذب امـواج مایکروویـو و ضریـب انبسـاط حرارتـی مـواد معدنـی[3] شـیل‌های نفتـی اسـت [۱۳]. بررسـی افزایـش فشـار منفـذی آب در اثـر تابـش امـواج الکترومغناطیسـی توسـط چـن و همـکاران [۱۴] انجـام گردیـده اسـت. آنها نشـان دادنـد کـه حرارت‌دهـی بـا اسـتفاد از امـواج مایکروویـو می‌توانـد بـه عنـوان یـک روش مؤثـر بـرای تولیـد هیدروکربن‌هـای سـبک در مخـازن شـیل نفتـی بـه‌کار گرفتـه شـود، چـرا کـه آب منفـذی به‌وسـیله تابش مایکروویـو، بـه سـرعت گـرم شـده و فشـار متناسـب بـا آن افزایـش می‌یابـد کـه سـاز و کار بسـیار مؤثـری بـرای شکسـت سـنگ اسـت. برخـی از محققـان اعتقـاد دارنـد کـه تأثیـر مایکروویـو برروی شـیل‌های نفتـی به‌منظـور تولیـد نفـت شـیل عـلاوه بـر خـواص دی الکتریـک [۱۵] بـه حضـور آب در ماتریکـس [۱۶]، دمـای شـیل نفتـی [۱۷] و میـزان نفـوذ امـواج در سـاختار شـیل نفتـی [۱۸] نیـز بسـتگی دارد. تابـش مایکروویـو بـه دلیـل سـازوکار گرمایـش انتخابـی و حجمـی[4] سـبب افزایـش مقـدار نفـت تولیـدی، همـراه بـا کاهـش عناصـر گوگـرد، نیتـروژن، اکسـیژن و افزایـش هیدروکربن‌هـای سـبک و در نتیجـه سـبب ارتقـاء کیفیـت نفـت تولیـدی نیـز می‌گـردد [۱۹]. در ایـن مطالعـه بـه بررسـی تولیـد و کیفیـت نفـت تولیـدی از نمونـه شـیل‌های نفتـی ایـران بـا اسـتفاده از امـواج مایکروویـو در نرخ‌هـای حرارت‌دهـی مختلـف پرداختـه شـده اسـت. همچنیـن بـا حرارت‌دهـی معمولـی در فرآینـد پیرولیـز مقایسـه شـده اسـت.

بسـیاری از مطالعـات ژئو شـیمیایی اخیـر بیانگـر وجـود پتانسـیل خـوب نفت-شـیل در نقـاط مختلـف ایـران می‌باشـد. [۲۰-۲۴]. ایـن مطالعـات نشـان می‌دهـد بهتریـن کیفیـت سـنگ مخزنـی شـیل در قالـی کـوه لرسـتان از رشـته کـوه زاگـرس در جنـوب غربـی ایـران قـرار دارد. سـازندهای سـرگلو (ژوراسـیک میانـی) و گـرو (کرتاسـه زیریـن) بـا ضخامـت و حجـم قابـل قبـول دیـده شـده است

خلاصـه مشـخصات نمونه‌هـای اسـتفاده شـده در جـدول ۱ آورده شـده اسـت. وجـود TOC بـالا بیانگـر غنـای زیـاد مـواد هیدروکربـوری می‌باشـد. انتخـاب ایـن نمونه‌هـا به‌دلیـل محدودیـت در فیشـر[5] سـاخته شـده و حجـم نمونـه مـورد نیـاز جهـت آنالیـز نمونه‌هـای نفـت تولیـدی بـود.

روش انجام آزمایشات

طراحـی آزمایشـات بـا اسـتفاده از روش تاگوچـی بـرای پارامترهـای مختلـف انجـام گردیـد. بـا توجـه بـه کـم بـودن نمونـه بـا مشـخصات یکسـان از ترکیـب پـودر سـه نمونـه ذکـر شـده در جـدول ۱ اسـتفاده شـد و جهـت اعتمـاد سـنجی آزمایش‌هـا یـک بـار تکـرار گردیـد. در هـر مرحلـه از آزمایـش g ۳۰ نمونـه شـیل نفتـی سـازند سـرگلو واقـع در قالـی کـوه لرسـتان مـورد اسـتفاده قـرار گرفتـه اسـت.

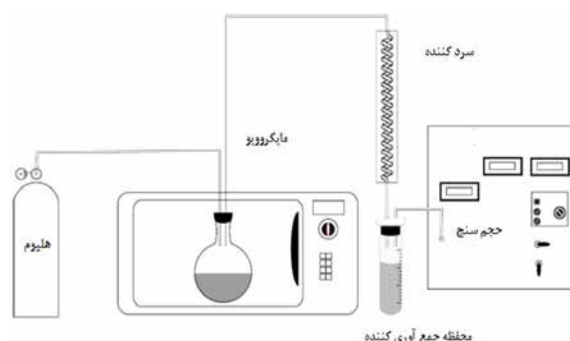
جدول ۱ مشخصات نمونه‌های استفاده شده آزمایش راک ول

ناحیه	سازند	نمونه	MINC (٪)	T_{max} (°C)	S_3 (mg/g)	S_2 (mg/g)	S_1 (mg/g)	TOC (٪)
سم چال	سرگلو	GH-T15-06	۹	۶۴۴	۰/۵۴	۱۰۲/۰۱	۱/۹۵	۶/۶۱
دره ناک	سرگلو	GH-T50-04	۶/۷۶	۰۴۴	۳/۳۱	۹۳/۳۶	۱/۴۷	۲۱/۷۵
پیر بادوش	سرگلو	GH-T41-09	۵/۸	۳۴۴	۱/۹	۱۰۹/۵۵	۲/۰۹	۲۱/۴۲

1. Competitive chemical kinetics
2. Grindability
3. Thermal Expansion Coefficient of Minerals
4. Selective and Volumetric Heating
5. Fischer Assay

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۵۷-۴۳

نمونه‌های شیل نفتی یکبار با حرارت‌دهی معمولی و یکبار نیز با استفاده از امواج مایکروویو تحت تابش قرار می‌گیرند تا نفت-شیل تولیدی از آنها استحصال گردد. برای این منظور از دستگاه فیشر توسعه یافته با امواج مایکروویو و حرارت‌دهی معمولی استفاده شد. شماتیکی از این دستگاه در شکل ۱ آورده شده است. ابتدا نمونه شیل نفتی پودر شده را تحت تابش امواج مایکروویو در توان‌های ۶۵۰، ۹۰۰ و W ۱۲۰۰ قرار می‌دهیم و در بازه‌های زمانی مختلف دمای شیل نفتی را اندازه‌گیری می‌کنیم.

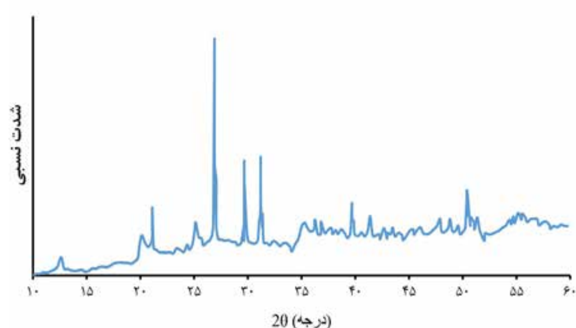


شکل ۱ شماتیکی از دستگاه فیشر توسعه یافته با امواج مایکروویو و حرارت‌دهی معمولی.

براساس دماهای ثبت شده برای نمونه‌های تحت تابش امواج مایکروویو، نمونه‌های شیل نفتی تحت حرارت‌دهی معمولی با همان نرخ حرارت‌دهی قرار می‌گیرند. هدف رسیدن به همان دماهای تحت تابش مایکروویو بود که بعضاً احتمال داشت اختلاف اندکی نیز وجود داشته باشد. بعد از آنکه کل مسیر تا حجم سنج[1] بوسیله هلیوم اشباع گردید، فرایند حرارت‌دهی مایکروویو در بازه‌های زمانی گفته شده تحت بسامد GHz ۲/۴۵ انجام می‌گیرد. در اثر حرارت‌دهی نمونه‌های شیل نفتی، گاز خروجی وارد حجم سنج می‌شود. مقدار نفت خروجی نیز در اثر شکست حرارتی پس از خنک‌شدن توسط سیستم خنک‌کننده وارد ظرف جمع‌آوری کننده[2] گردیده است. مقدار ترکیبات اشباع، آروماتیک، رزین و آسفالتین (SARA) نفت-شیل در هر مرحله تعیین گردیدند (ASTM D-4124 و IP-143). میزان ترکیبات عنصری نفت-شیل‌های تولیدی شامل عناصر کربن، سولفور، نیتروژن و اکسیژن آنها نیز با استفاده از دستگاه Vario Max-CHNS elementar اندازه‌گیری شدند (ASTM D5453-ASTM D4294). همچنین برخی ترکیبات و باندها و پیوندهای نفت شیل تولیدی نیز با استفاده از روش تبدیل فوریه مادون قرمز[3] (FTIR) تعیین گردیده‌اند.

آنالیز نتایج

شکل ۲ طیف پراش اشعه ایکس[4] نمونه شیل نفتی حاوی محتوای آلی و کانی‌های معدنی را نشان می‌دهد. کلسیت، دولومیت، کوارتز همراه با کانی‌های رسی کائولینیت، موسکویت و آنکریت اصلی‌ترین کانی‌های سازنده فاز کریستالی شیل نفتی می‌باشند.

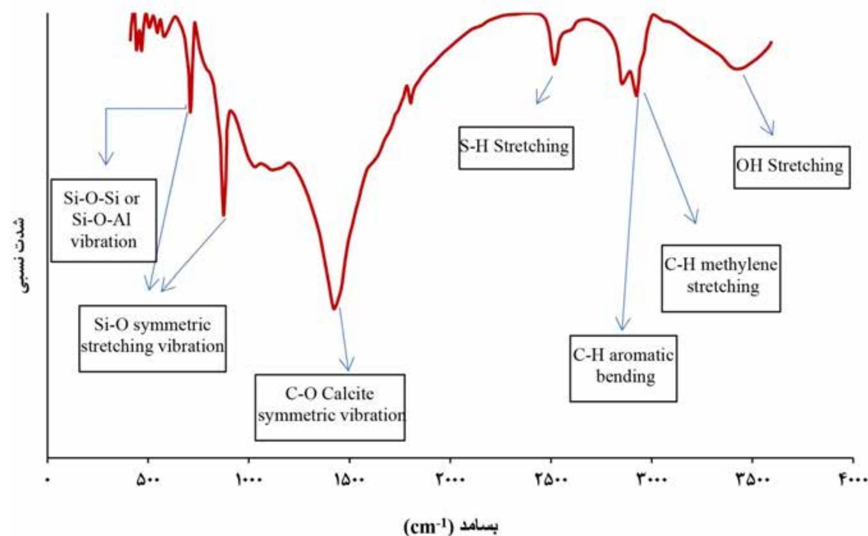


شکل ۲ طیف XRD نمونه شیل نفتی مورد مطالعه.

شکل ۳ طیف FTIR نمونه شیل نفتی را نشان می‌دهد. براساس انطباق نتایج شکل‌های ۲ و ۳، درصد فراوانی عناصر در شیل نفتی در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج مقدار نفت-شیل تولیدی حاصل از نمونه‌های شیل- نفتی با نرخ‌های حرارت‌دهی متفاوت از نظر حرارت‌دهی با امواج مایکروویو و حرارت‌دهی معمولی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج مربوط به مقدار نفت شیل تولیدی برای نمونه‌های مختلف شیل‌های نفتی در جدول ۳ آورده شده است.

1. Gas Meter
2. Receiving Flask
3. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
4. X-Ray Diffraction



شکل ۳ طیف FTIR نمونه شیل نفتی مورد مطالعه

جدول ۲ درصد فراوانی عناصر در ساختار شیل نفتی

کربن	اکسیژن	آلومینیوم	سیلیسیوم	گوگرد	کلسیم	آهن
۲۶/۹۲۷	۳۸/۲۱۵	۱/۰۷۸	۳/۵۳	۴/۵	۲۴/۳۱۸	۱/۴۳۲

جدول ۳ نمونه‌های شیل نفتی تحت حرارت‌دهی

نمونه	نوع حرارت‌دهی (توان اسمی)	دمای نهایی (°C)	زمان حرارت‌دهی (min)	درصد وزنی نفت تولیدی
M1	مایکروویو W 650	۷۰۷	۵۶	۵/۲
M2	مایکروویو W 900	۷۱۹	۳۶	۹/۵
M3	مایکروویو W 1200	۷۳۱	۲۷	۵
C1	معمولی	۷۱۰	۵	۴/۷
C2	معمولی	۷۲۰	۳۵	۵/۴
C3	معمولی	۷۳۰	۲۵	۳/۴

نتایج مربوط به مقدار نفت شیل تولیدی برای نمونه‌های مختلف شیل‌های نفتی در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی نمونه‌ها، نمونه شیل‌های نفتی که تحت تابش امواج مایکروویو قرار گرفته‌اند بیشترین بازدهی را در تولید نفت نشان می‌دهند. با افزایش نرخ حرارت‌دهی از نمونه M1 (°C/min) ۱۲/۶به نمونه M2 (°C/min) ۱۹/۹ مقدار نفت شیل تولیدی به ترتیب از ۵/۲ ٪ به ۵/۹ درصد وزنی می‌رسد. اما با افزایش نرخ حرارت‌دهی به °C/min ۲۷در نمونه M3 بازدهی نفت شیل تولیدی به حدود ۵ درصد وزنی کاهش می‌یابد. در واقع یک نرخ بهینه برای بیشینه میزان بازدهی نفت-شیل تولیدی در نمونه‌های شیل نفتی تحت تابش امواج مایکروویو وجود دارد. در واقع در دماهای پایین نفت-شیل که هنوز بخار نشده، می‌تواند در طی فرایند کک‌سازی[1] به چار[2] تبدیل شود و فرایند پیرولیز به‌طور کامل صورت نگیرد که در این صورت بازدهی نفت-شیل تولیدی پایین خواهد بود [۲۵]. از سوی دیگر در دماهای بالا نیز به‌دلیل شکست حرارتی ثانویه[3] نفت-شیل، می‌توان شاهد تبدیل آن به گازهای هیدروکربنی بود [۲۶]. با افزایش نرخ حرارت‌دهی

1. Coking
2. Char
3. Secondary Cracking

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۵۷-۴۳

از نمونه M1 به M2، مقدار تولید نفت شیل افزایش می‌یابد، چرا که مقدار کاهش جرمی[1] شیل نفتی افزایش یافته است. در واقع نرخ حرارت‌دهی با امواج مایکروویو بر هر دو پارامتر تبدیل[2] و بازدهی نفت شیل تولیدی یعنی بر آزاد سازی آب و هیدروکربن بین مولکولی[3] و تجزیه کروژن تأثیرگذار است. اما با افزایش نرخ حرارت‌دهی از نمونه M2 به M3، در محدوده‌های اشاره شده، مقدار نفت شیل تولیدی کاهش می‌یابد که این کاهش ممکن است با تغییراتی در ترکیبات و خواص فیزیکی نفت شیل نیز همراه باشد [۲۷]. در نمونه‌های شیل نفتی تحت حرارت‌دهی معمولی، با افزایش نرخ حرارت‌دهی، بازدهی نفت-شیل تولیدی روند کاهشی دارد و بیشترین بازدهی را در کمترین نرخ حرارت‌دهی می‌بینیم. این ممکن است به این دلیل باشد که با افزایش نرخ حرارت‌دهی، عملا فرایند پیرولیز بیشتر فعال شده و سبب می‌شود حجم بالایی از کروژن مستقیما به گاز تبدیل شود [۲۸].

در محدوده زمانی مطالعات انجام شده، روش حرارت‌دهی با استفاده از امواج مایکروویو، بازدهی بالاتری از حرارت‌دهی معمولی داشته است. در واقع فرایندهای درون ذره ای خودتولیدی[4] مرتبط با تبخیر نفت شیل تنها موردی هست که می‌تواند سبب تولید و حذف نفت شیل از بلوک شیل نفتی گردد. در فرایند پیرولیز شیل نفتی در نرخ‌های حرارت‌دهی بالاتر در نمونه‌های C2 ، M3 و C3، ممکن است نفت شیل تولیدی به دلیل واکنش‌های شکست حرارتی ثانویه و تشکیل کک، کاهش یابد. فرایند کک‌شدگی یکی از اصلی‌ترین فرایندهای تجزیه نفت درون ذره‌ای[5] است که با افزایش نرخ حرارت‌دهی می‌تواند کاهش یابد. از طرف دیگر، افزایش نرخ حرارت‌دهی سبب افزایش نفت شیل تولیدی از نمونه M1 به M2 می‌گردد که ممکن است به‌دلیل تولید بالاتر نرخ‌های جاروب نفت خودتولید شده[6] در فرایند پیرولیز باشد [۲۹].

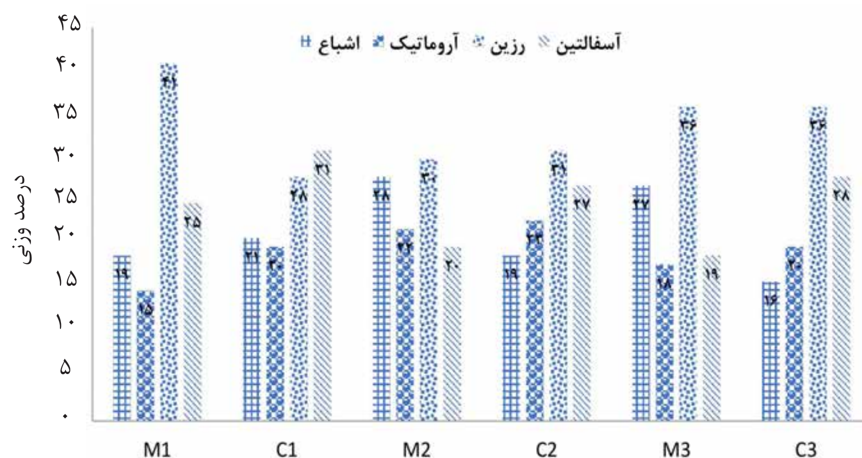
همچنین به‌دلیل تولید نفت شیل در دماهای بالاتر، فرایند شکست حرارتی فاز گازی[7] القاء می‌گردد و همین نیز سبب کاهش بازدهی نفت شیل تولیدی می‌گردد [۳۰]. البته برخی نتایج نشان می‌دهد با افزایش نرخ حرارت‌دهی، بازدهی نفت شیل نیز افزایش می‌یابد [۳۱]. استدلال آنها این بوده که با افزایش نرخ حرارت‌دهی، نفت شیل سریع‌تر از بلوک شیل نفتی تولید و خارج می‌گردد و در واقع فرصت کافی برای تحت حرارت قرار گرفتن در درون شیل نفتی وجود ندارد. این استدلال در مورد نفت-شیل‌هایی که در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، صدق نمی‌کند.

به لحاظ بررسی کیفی نفت‌های تولیدی، آنالیز ترکیبات سارا و عناصر کربن، سولفور، نیتروژن و اکسیژن نمونه نفت‌های تولیدی از شیل‌های نفتی تحت نرخ‌های حرارت‌دهی مختلف با امواج مایکروویو و حرارت‌دهی معمولی در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده‌اند.

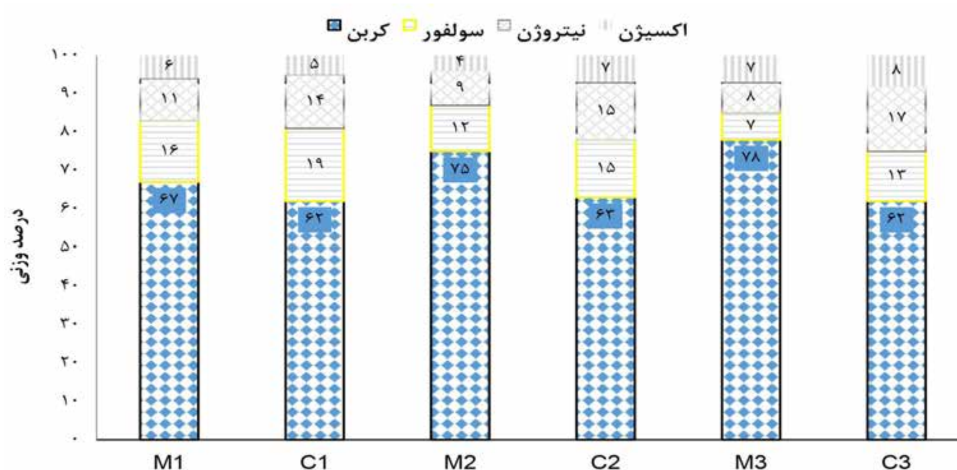
تغییرات برش اشباع: در نمونه‌های تحت حرارت‌دهی با امواج مایکروویو، شاهد افزایش ترکیبات اشباع از نمونه M1 به M2 هستیم و در نمونه M3 تقریبا ثابت می‌ماند. در نمونه شیل‌های نفتی تحت پیرولیز با حرارت‌دهی معمولی، با افزایش نرخ حرارت‌دهی، ترکیبات اشباع در نفت شیل‌های تولیدی روند کاهشی دارد و از ۲۱ درصد وزنی در نمونه C1 به حدود ۱۶ درصد وزنی در C3 می‌رسد.

تغییرات برش آروماتیک: ترکیبات آروماتیکی با افزایش نرخ حرارت‌دهی با امواج مایکروویو ابتدا افزایش (حدود ۷ درصد وزنی) و در نمونه M3 روند کاهشی به خود می‌گیرد (حدود ۴ درصد وزنی).

1. Mass Loss
2. Conversion
3. Liberation of Intermolecular
4. The self-generated Intraparticle
5. Intraparticle Oil Degradation
6. Self-generated Gas Sweep Rates
7. Gas Phase Cracking



شکل ۴ مقدار ترکیبات سارا نفت‌های تولید شده از نمونه شیل‌های نفتی.



شکل۵ نتایج مربوط به مقادیر عناصر کربن، سولفور، نیتروژن و اکسیژن در نفت شیل‌های تولیدی از نمونه‌های شیل نفتی.

ترکیبات آروماتیکی بین ۲۰ تا ۲۳ درصد وزنی در نمونه نفت-شیل‌های تولیدی در نرخ‌های حرارت‌دهی معمولی نوسان دارند.

تغییرات برش رزین: بیشترین مقادیر ترکیبات رزینی در نمونه M1 می‌باشد (۴۱ درصد وزنی) که با افزایش نرخ حرارت‌دهی با امواج مایکروویو ابتدا کاهش یافته (۳۰ درصد وزنی) و با افزایش بیشتر نرخ حرارت‌دهی، روند افزایشی پیدا می‌کند (۳۶ درصد وزنی). در حرارت‌دهی مستقیم ترکیبات رزینی با افزایش نرخ حرارت‌دهی روند افزایشی را از خود نشان می‌دهند و از ۲۸ درصد وزنی به ۳۱ درصد وزنی و در نهایت در نمونه C3 به ۳۶ درصد وزنی می‌رسند.

تغییرات برش آسفالتین: با افزایش نرخ حرارت‌دهی با امواج مایکروویو در نمونه M2، شاهد کاهش حدود ۵٪ ترکیبات آسفالتینی در نمونه نفت شیل هستیم. در نمونه M3 نیز کاهش ترکیبات آسفالتینی مشاهده می‌گردد اما تغییرات نسبت به نمونهM2 محسوس نمی‌باشد. در حرارت‌دهی مستقیم ترکیبات آسفالتینی نیز با افزایش نرخ حرارت‌دهی معمولی مقدار این ترکیبات از ۳۱ درصد وزنی در نمونه نفت شیل C1 به ۲۷ درصد وزنی در نمونه C2 می‌رسد و تقریبا در نمونه C3 تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهد. نتایج در شکل ۴ آورده شده است. در تمامی نمونه نفت شیل‌های تولید شده با افزایش نرخ حرارت‌دهی با امواج مایکروویو، مقادیر

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۵۷-۴۳

سولفور کاهش می‌یابد و در نمونه M3 مقدار سولفور در حدود ۵۶٪ کاهش یافته است. در نمونه نفت شیل‌های تولیدی در اثر حرارت‌دهی معمولی نیز شاهد کاهش مقادیر سولفور هستیم و این کاهش در حدود ۳۱٪ می‌باشد (شکل ۵).

ترکیبات نیتروژنی نیز در نفت شیل‌های تولیدی روند کاهشی در برابر افزایش نرخ حرارت‌دهی با امواج مایکروویو به خود می‌گیرند و در نمونه‌های M1، M2 و M3 به ترتیب از ۱۱ به ۹ و سپس به ۸ درصد وزنی می‌رسد. این در حالی است که در نفت شیل‌های تولیدی در اثر حرارت‌دهی معمولی، شاهد افزایش مقادیر نیتروژن از ۱۴ به ۱۷ و نهایتا به ۱۹ درصد وزنی به ترتیب در نمونه‌های C1، C2 و C3 می‌باشیم.

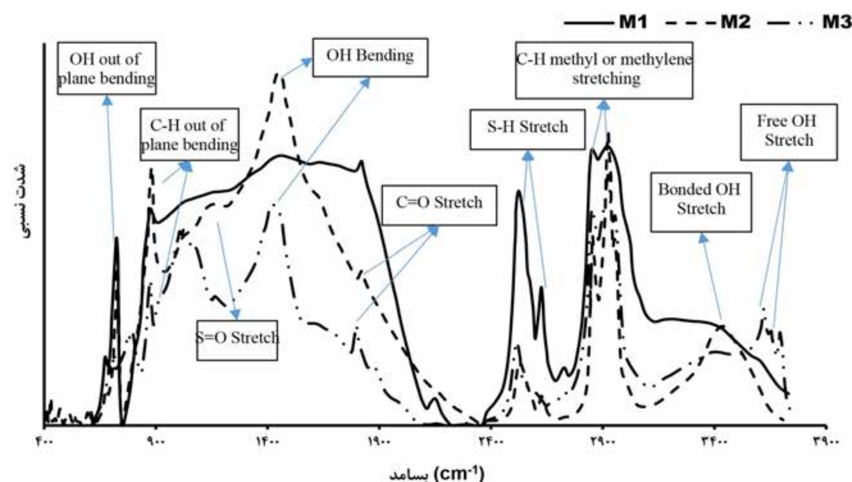
عنصر اکسیژن در نمونه نفت-شیل‌های تولیدی با امواج مایکروووویو، با افزایش نرخ حرارت‌دهی ابتدا روند کاهشی و سپس افزایشی می‌یابد (از ۶ درصد وزنی در نمونه M1 به ترتیب به ۴ و سپس ۷ درصد وزنی در نمونه‌های M2 و M3 می‌رسد). در حالی که در نمونه‌های C1، C2 و C3 همانند نیتروژن مقادیر اکسیژن روند افزایشی را نشان می‌دهند و از ۵ درصد ابتدا به ۷ و سپس به ۸ درصد وزنی می‌رسد.

کمیت و کیفیت نفت تولیدی با استفاده از امواج مایکروویو، به درجه حرارت اعمالی طی پیرولیز شیل نفتی وابسته است. هنگامی که دمای اعمالی به شیل نفتی افزایش پیدا می‌کند، ترکیبات هیدروکربنی با وزن مولکولی کم تولید می‌شوند. این در حالی است که در طی فرایند، برش‌های سنگین نفت[1] که دارای نقطه جوش بالایی نیز هستند، بخار می‌شوند. در عین حال در دماهای پایین پیرولیز نیز، ترکیبات با نقطه جوش بالا در نفت شیل، مقادیر بیشتری از نفت شیل را تشکیل خواهند داد. در واقع واضح است که در نرخ حرارت‌دهی پایین، به زمان بیشتری برای رسیدن به دمای واکنش بالاتر نیاز است، بنابراین میزان نفت شیل تولید شده هنگام افزایش دمای واکنش بر توزیع و ترکیبات محصولات اثرگذار می‌باشد [۳۲]. این امر می‌تواند به دلیل هیدروژن‌زدایی[2] ترکیبات سنگین، دی آلکیلاسیون[3] و واکنش اصلاحی[4] مربوط باشد [۳۳]. علاوه براین، افزایش نرخ حرارت‌دهی ممکن است افزایش چگالی نفت شیل را به دنبال داشته باشد، در حالی که مقدار گوگرد در آن کاهش می‌یابد [۳۴]. به صورت کلی، ترکیبات سولفوردار پتانسیل بالایی را در جذب امواج مایکروویو دارند [۳۷- ۳۵] و همین امر سبب ایجاد مناطق داغ در مواد و در نتیجه حذف ترکیبات گوگردی از نمونه می‌گردند [۴۰- ۳۸]. به همین دلیل نفت شیل‌های تولیدی در اثر پیرولیز با امواج مایکرویو در تمامی نمونه‌ها نسبت به پیرولیز با حرارت‌دهی معمولی، مقادیر کمتری سولفور را دارا می‌باشند.

در نرخ‌های حرارت‌دهی بالا ممکن است شاهد یک فرایند انتشار محدود[5] باشیم که تحت تأثیر دما و محصول تولید شده می‌باشد [۴۱] چرا که با افزایش نرخ حرارت‌دهی در واقع میزان کنترل انتشار[6] افزایش می‌یابد و محصولات سریع‌تر از منافذ شیل نفتی تولید و منتشر می‌شوند که منجر به رخ دادن واکنش‌هایی می‌گردد که کک‌شدگی ثانویه را رقم می‌زنند. از طرف دیگر، در فرایند پیرولیز شیل نفتی در نرخ‌های حرارت‌دهی بالا، بخارات پیرولیز با سرعت بیشتری تولید می‌شوند و می‌توانند از منافذ شیل فرار کنند، چرا که زمان کافی برای توسعه تخلخل در شیل نفتی وجود ندارد. در نتیجه کک‌سازی نفت شیل رخ می‌دهد [۴۲] و به دنبال آن بازدهی نفت شیل کاهش می‌یابد (جدول ۳) اما تغییراتی که ترکیبات نفت شیل اتفاق می‌افتد، به بهبود کیفیت آن منجر گردد (شکل‌های ۴ و ۵). با افزایش توان مایکروویو، عملا نرخ حرارت‌دهی

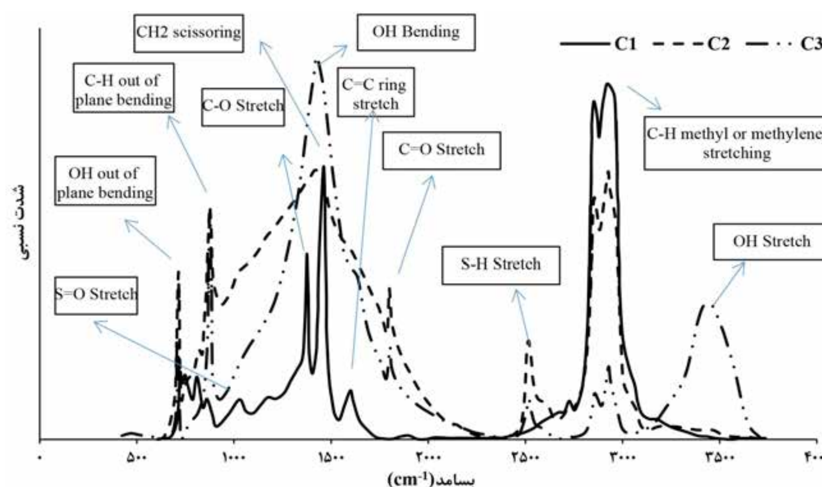
1. Heavy Oil Fractions
2. Dehydrogenation
3. The Dealkylation
4. Reforming Reaction
5. Diffusion Limited
6. Extent of Diffusion Control

افزایش یافته و در نتیجه زمان قرار گرفتن ذرات در یک دمای مشخص کاهش می‌یابد. از طرفی، تشکیل نفت شیل پس از زمان نهان¹ می‌باشد که با افزایش توان مایکروویو، این زمان کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت تشکیل نفت شیل به شیب فشاری و دمایی گاز داخل دانه‌های شیل نفتی نیز وابسته است که در توان‌های پایین مایکروویو (زمان نهان پایین) ناچیز و در توان های بالا (نرخ حرارت‌دهی بالا) قابل توجه است [۴۳] این پدیده به خواص پتروفیزیکی شیل نفتی از جمله اندازه دانه‌ها، تخلخل و تروایی نیز بستگی دارد که با افزایش توان مایکروویو، افزایش می‌یابد. این پدیده‌ها به محض تشکیل نفت شیل در دانه‌های شیل نفتی امکان بازیابی سریع‌تر را فراهم می‌کنند [۴۴]. افزایش توان امواج مایکروویو منجربه تخریب سریع‌تر کروژن و آغاز تجزیه ماتریکس مواد معدنی شیل نفتی در فرایند پیرولیز می‌گردد. نتیجه آن ممکن است منجر به ترکیبات قطبی شود که تلفات دی الکتریک² بالایی دارند [۴۵]. همچنین ترکیبات یونی و رسانایی که با هدایت الکتریکی باعث گرم شدن یکنواخت شیل نفتی می‌گردند [۴۶]، این امر سبب افزایش شکست حرارتی ترکیبات آسفالتینی در نمونه‌های M2 و M3 گردیده است. تولیدات به‌وجود آمده از کروژن و نیز خاکستر باقیمانده در طی فرایند پیرولیز پتانسیل بالایی را در جذب امواج مایکروویو دارند [۴۷]. همین امر سبب افزایش بازدهی امواج مایکروویو در شکست حرارتی ترکیبات سنگین‌تر و ارتقاء کیفیت نفت شیل تولیدی می‌گردد (شکل‌های ۶ و ۷). نفت شیل تولیدی در اثر تابش مایکروویو دارای ترکیبات آسفالتینی و قطبی کمتری نسبت به حالت حرارت‌دهی معمولی می‌باشد. با افزایش توان مایکروویو درصد ترکیبات قطبی و آروماتیکی به دلیل تجزیه و تخریب مولکول‌های بزرگ کروژن و آسفالتین، کاهش می‌یابند [۴۹، ۴۸]. در نمونه M3 شاهد افزایش ترکیبات آسفالتینی هستیم که ممکن است بیشتر به دلیل تجزیه سایر ترکیبات دیگر باشد. می‌توان نتیجه گرفت افزایش توان امواج مایکروویو و افزایش سریع دما در فرایند حرارت‌دهی معمولی، واکنش‌های شکست حرارتی مرتبط با نرمال آلکان‌ها با زنجیره بلند³ را القاء می‌نمایند و سبب کاهش مقدار آنها در نفت شیل می‌گردند. مقدار پایین ترکیبات اشباع در نفت شیل تولیدی با حرارت‌دهی معمولی که با افزایش نرخ حرارت‌دهی نیز تشدید می‌گردد (نمونه‌های C2 و C3) نیز با این واقعیت تطابق دارد.



شکل ۶ طیف FTIR نفت استحصال شده از نمونه شیل نفتی با استفاده از تابش امواج مایکروویو

1. Latent Time
2. Dielectric Losses
3. Long-chain n-alkanes



شکل ۷ طیف FTIR نفت استحصال شده از نمونه شیل نفتی با استفاده از حرارت‌دهی معمولی

طیف FTIR نمونه نفت شیل استحصال شده از شیل نفتی در اثر تابش امواج مایکروویو و حرارت‌دهی معمولی در شکل‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده هستند. در بازه cm^{-1} ۳۷۰۰-۳۰۰۰ طیف نفت M3 سه پیک در بسامد cm^{-1} ۳۶۹۴، cm^{-1} ۳۶۴۹و cm^{-1} ۳۶۲۶ به صورت واضح و مجاور هم قرار دارند. این سه پیک متناظر با گروه عاملی هیدروکسیل آزاد هستند که تحت پیوند هیدروژنی با ساختارهای مجاور قرار نگرفته‌اند و در نتیجه موقعیت آنها به سمت بسامدهای بیشتر شیفت پیدا کرده است. حضور هیدروکسیل آزاد دو دلیل عمده دارد؛ دلیل اول غلظت پایین گروه عاملی هیدروکسیل در نمونه می‌باشد. دلیل دوم حضور ساختارهای دیگر در نفت خام است که در نقش پوشش عمل کرده و مانع از برهم‌کنش هیدروژنی مولکول‌ها می‌شوند. در نفت شیل M1 بر خلاف نفت شیل M3، در بازه cm^{-1} ۳۷۰۰-۳۰۰۰ هیچ پیکی مشاهده نشد. بنابراین در نفت M1 برش‌های هیدروکسیل‌دار آسفالتین و رزین فراوانی کمتری دارند. در نفت M2 نیز در بسامد cm^{-1} ۳۴۲۵ پیک پهن با شدت متوسط حضور دارد که متناظر با پیوند گروه هیدروکسیلی[1] می‌باشد. این پیک نسبت به نمونه مشابه در نمونه M3 پهن‌تر بوده و در بسامد کمتری ظاهر شده است. در بین نفت‌های حاصل از روش حرارت‌دهی معمولی، تنها در طیف نمونه C3 پیک متناظر با گروه عاملی هیدروکسیل مشاهده شد. بنابراین نفت حاصل از تابش مایکروویو بر خلاف نفت حاصل از حرارت‌دهی معمولی همواره دارای گروه هیدروکسیل می‌باشد.

پیک‌های حاضر در بسامد cm^{-1} ۳۰۰۰-۲۷۰۰ جزء قوی‌ترین پیک‌های طیف نمونه نفت می‌باشند. دو پیک در این محدوده بسامد مشاهده می‌شوند. پیک در بسامد cm^{-1} ۵ ±۲۹۲۳ متناظر با پیوند نامتقارن C-H و پیک واقع در cm^{-1} ۵ ±۲۸۵۳ متناظر با پیوند متقارن C-H هستند که هر دو پیک مربوط به گروه عاملی متیلن می‌باشند. پیک واقع در بسامد cm^{-1} ۵ ±۲۹۵۳ مربوط با پیوند نامتقارن C-H است که در گروه عاملی متیل واقع شده باشد. این پیک تنها در دو نمونه نفت خام M3 و M2 مشاهده شد. عدم ظهور پیک مذکور در طیف نفت خام M1 نشان می‌دهد نمونه مذکور کمتر آلیفاتیکی بوده و ترکیبات پارافینی در آنها نسبت به دو نمونه دیگر کمتر است. در روش حرارت‌دهی معمولی نیز، شدت پیک‌های متناظر با ترکیبات آلیفاتیکی در نمونه C1 بیشتر بوده و در نمونه C3 کمینه است. در بازه cm^{-1} ۲۷۰۰-۲۳۰۰ پیک S-H موجود در گروه عاملی تیول به چشم می‌خورد.

1. Bonded O-H stretching in Hydroxyl Group

حضـور تیـول بـه نفـت خـام قابلیـت برقـراری پیونـد هیدروژنـی می‌بخشـد؛ امـا از آنجایـی کـه اختـلاف الکترونگاتیـوی گوگـرد و هیـدروژن زیـاد نیسـت، پیونـد S-H نسـبت بـه پیونـد O-H از ممـان قطبـی کمتـری برخـوردار بـوده و در دسـته پیوندهـای نسـبتا قطبـی طبقه‌بنـدی خواهـد شـد. در طیـف هـر سـه نمونـه نفـت اسـتحصال شـده از شـیل نفتـی توسـط امـواج مایکروویـو ایـن پیـک در بسـامد $2518 \pm 5\ cm^{-1}$ مشـاهده می‌شـود کـه نشـان می‌دهـد پیونـد S–H در هـر سـه نمونـه حضـور دارد. عـلاوه بـر ایـن پیـک دیگـری در بسـامد $2626\ cm^{-1}$ در طیـف دو نمونـه نفـت خـام M1 و M2 مشـاهده شـد کـه متناظـر بـا پیونـد سـولوفور و گـروه بنزنـی[1] می‌باشـد کـه احتمـالا بـه دلیـل سـاختار مولکولـی، در حالـت آزاد قـرار دارنـد. پیـک شـارپ متناظـر بـا پیونـد گـروه تیـول[2] نیـز در بسـامد $727\ cm^{-1}$ در هـر سـه نمونـه مشـاهده شـد. پیـک متناظـر بـا تیـول در دو نمونـه C1 و C2 نیـز بـا شـدت قابـل ملاحظـه ظاهـر شـدند؛ بـا ایـن حـال در نمونـه C3 توسـط پیک‌هـای مجـاور پوشـانده شـدند. در ضمـن شـدت پیک‌هـای متناظـر بـا ترکیبـات گوگـرددار در نفـت حاصـل از تابـش امـواج مایکروویـو بـا تـوان پاییـن بسـیار قابـل توجـه می‌باشـد. امـا تابـش امـواج بـا تـوان بالاتـر نقـش گوگـردزدا نیـز خواهنـد داشـت؛ چراکـه در دو نمونـه M2 و M3 شـدت پیـک بـه طـور قابـل ملاحظـه کاهـش یافتـه اسـت.

بـازه $2000 - 1000\ cm^{-1}$ تحـت عنوان ناحیه اثر انگشـتی شـناخته می‌شـود. پیک‌هـای ظاهـر شـده در سـه نمونـه نفـت حاصـل شـده در ایـن ناحیـه تا حـدود زیـادی با هم تفـاوت دارنـد. در نمونـه M3، پیک در بسـامد $1797\ cm^{-1}$ مشـاهده می‌شـود. ایـن پیـک مربـوط بـه پیونـد گـروه[3] C=O اسـت؛ بـا ایـن تفـاوت کـه C=O متعلـق بـه گـروه عاملـی کتـون نیسـت و درون گـروه عاملی کربوکسـیلیک اسـید حضـور دارد. ایـن موضـوع از طریـق بسـامد پیـک قابـل اسـتنباط اسـت. حضـور هیدروکسـیل در مجـاورت C=O سـبب شـده تـا اثـر القایـی بـر روی پیونـد سـیگما تقویـت شـده و در نتیجـه بسـامد ظهـور آن نسـبت بـه کتـون خالـص افزایـش یابـد. پیـک بسـیار پهـن و شـدید در بسـامد $1420\ cm^{-1}$ متناظـر بـا پیونـد O-H اسـت کـه دلیـل پهن‌بـودن پیـک آن نسـبت بـه حالـت معمولـی ادغـام آن بـا دو پیـک مجـاور CH_2[4] و C-O[5] اسـت. پیـک واقـع در بسـامد $1166\ cm^{-1}$ در طیـف نفـت خـام M3 مربـوط بـه پیونـد C-O بـوده و بـا توجـه بـه بسـامد وقـوع آن نشـان می‌دهـد هیدروکسـیل حاضـر در ایـن نمونـه از نـوع درجـه سـوم اشـباع می‌باشـد. دو پیـک حاضـر در بسـامد $1079\ cm^{-1}$ و $1032\ cm^{-1}$ مربـوط بـه گـروه عاملـی سولفوکسـاید می‌باشـند. بـا ایـن تفـاوت کـه پیـک $1079\ cm^{-1}$ مربـوط بـه گـروه عاملـی S=O اسـت کـه در آن گوگـرد بـه یـک کربـن آلیفاتیکـی و یـک کربـن آروماتیکـی متصـل اسـت. پیـک $1032\ cm^{-1}$ مربـوط بـه S=O اسـت کـه در آن گوگـرد بـه دو اتـم کربـن اشـباع متصـل اسـت. در نفـت خـام M۱ دو پیـک در بسـامد $1454\ cm^{-1}$و $1648\ cm^{-1}$ مشـاهده می‌شـوند کـه متناظـر بـا حلقـوی[6] C-C هسـتند و بیانگـر نمونـه غالبـا آروماتیکـی می‌باشـد. در نمونـه نفـت M2 پیـک بسـیار پهـن و شـدید در بسـامد $1455\ cm^{-1}$ حضـور دارد کـه متناظـر بـا پیونـد O-H می‌باشـد کـه البتـه پهـن بـودن ایـن پیـک بـه دلیـل ادغـام آن بـا پیک‌هـای مجـاور اسـت. پیـک موجـود در بسـامد $1159\ cm^{-1}$ نیـز مربـوط بـه پیونـد[7] C-O اسـت.

در بـازه $700-1000\ cm^{-1}$ کـه اصطلاحا ناحیـه آروماتیکی نامیـده می‌شـود، در نمونـه نفـت M3 و C3 سـه پیـک بـا شـدت متوسـط مشـاهده شـدند کـه متناظـر بـا گـروه آروماتیکـی[8] هسـتند. ظهـور همزمـان سـه پیـک در ایـن ناحیـه نشـان می‌دهـد کـه آرایـش غالـب حلقه‌هـای آروماتیکـی احتمـالا بـه فـرم ترکیبـات سـه حلقـه‌ای اسـت. پیـک حاضـر در بسـامد $694\ cm^{-1}$ متناظـر بـا پیونـد هـای بـه سـمت خـارج از صفحـه[9] اسـت. در چهار

1. S-H Stretch in Benzene Thiols
2. C-S Stretch in Thiol
3. C=O Stretching Band
4. CH_2 Scissoring Vibration
5. C-O Stretching
6. C-C Ring Stretch
7. C-O Stretching
8. Aromatic C-H Out of Plane Bending Vibration
9. O-H out of Plane Bending

نمونه نمونه نفت C1، M2، M1 و C2 تنها یک پیک در بسامد ۸۸۰ cm^{-1} مشاهده شد. طبق مطالعات پیشین، حضور یک پیک در ناحیه آروماتیکی در بازه ۹۰۰-۸۰۰ cm-1 نشانگر آرایش چهار حلقه ای ترکیبات آروماتیکی می‌باشد [۵۰].

نتیجه‌گیری

نرخ حرارت‌دهی یکی از فاکتورهای مهم در بحث افزایش مقدار تولید و ارتقاء کیفیت نفت-شیل تولیدی از شیل‌های نفتی می‌باشد. براساس نتایج به‌دست آمده از این مطالعه، پیرولیز شیل‌های نفتی با استفاده از امواج مایکروویو بازدهی بالاتری از نقطه نظر مقدار نفت-شیل تولیدی نسبت به پیرولیز با حرارت‌دهی معمولی دارد. در فرایند تولید نفت-شیل از شیل‌های نفتی، با افزایش نرخ حرارت‌دهی با استفاده از امواج مایکروویو، مقدار نفت-شیل ابتدا افزایش می‌یابد و سپس با افزایش بیشتر نرخ حرارت‌دهی روند کاهشی به خود می‌گیرد. در واقع در پیرولیز شیل‌های نفتی توسط امواج مایکروویو، یک نرخ حرارت‌دهی بهینه برای بیشترین مقدار تولید نفت شیل وجود دارد. در مورد پیرولیز شیل‌های نفتی با حرارت‌دهی معمولی نیز یک نرخ حرارت‌دهی بهینه وجود دارد، که در مورد این نمونه شیل‌های نفتی، با افزایش نرخ حرارت‌دهی، مقدار نفت-شیل تولیدی کاهش می‌یابد و ما در نرخ‌های حرارت‌دهی معمولی پایین، بیشترین میزان بازدهی نفت-شیل را از نقطه نظر مقدار تولید داریم. در بحث ارتقاء کیفیت نفت شیل‌های تولیدی نیز با تغییرات نرخ حرارت‌دهی عملا ترکیبات نفت شیل تولیدی تغییر می‌نماید. در نفت شیل‌های تولیدی با استفاده از حرارت‌دهی امواج مایکروویو، با افزایش نرخ حرارت‌دهی ترکیبات آسفالتینی و رزینی در مجموع روند کاهشی دارند و ترکیبات اشباع نیز در مجموع افزایش می‌یابند که نشان‌دهنده افزایش کیفیت نفت-شیل تولیدی با افزایش نرخ حرارت‌دهی می‌باشد. اما در نفت-شیل‌های تولیدی با استفاده از حرارت‌دهی معمولی با افزایش نرخ حرارت‌دهی، ترکیبات آسفالتینی تغییرات محسوسی ندارند و ترکیبات اشباع روند کاهشی پیدا می‌کنند و ترکیبات رزینی مقادیرشان افزایش می‌یابند. با افزایش نرخ حرارت‌دهی امواج مایکروویو مقدار عناصر سولفور و نیتروژن در نفت-شیلی کاهش می‌یابد و مقدار اکسیژن نیز ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش نرخ حرارت‌دهی معمولی تنها سولفور موجود در نفت شیل کاهش می‌یابد و عناصر نیتروژن و اکسیژن افزایش می‌یابند. نفت شیل تولیدی با امواج مایکروویو در تمامی نرخ‌های حرارت‌دهی حاوی ترکیبات هیدروکسیلی است که در نفت شیل‌های تولیدی با حرارت‌دهی معمولی این ترکیبات مشاهده نمی‌شود. با افزایش نرخ حرارت‌دهی در امواج مایکروویو، گروه عاملی متیلن در نفت شیل بوجود می‌آید که نشان دهنده آلیفاتیک بودن و افزایش ترکیبات پارافینی در آن است. در حالی که در حرارت‌دهی معمولی عکس این حالت رخ می‌دهد.

مراجع

[1]. Crawford, P., Biglarbigi, K., Dammer, A., & Knaus, E. (2008). Advances in world oil-shale production technologies. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, SPE-116570, doi.org/10.2118/116570-MS.
[2]. Dyni, J. R. (2006). Geology and resources of some world oil-shale deposits, Oil Shale, Scientific Investigations Report 2005–5294, 1-47.
[3]. Qian, J., Wang, J., & Li, S. (2003). Oil shale development in China, Oil Shale, 20(3; SUPP), 356-359, doi.org/10.1016/j.coal.2009.02.001.
[4]. Speight, J. G. (2012). Shale oil production processes. Gulf Professional Publishing.
[5]. Qian, Y., Yang, Q., Zhang, J., Zhou, H., & Yang, S. (2014). Development of an integrated oil shale refinery process with coal gasification for hydrogen production, Industrial & Engineering Chemistry Research, 53(51):

19970-19978, doi.org/10.1021/ie5024436.
[6]. Lan, X., Luo, W., Song, Y., Zhou, J., & Zhang, Q. (2015). Effect of the temperature on the characteristics of retorting products obtained by yaojie oil shale pyrolysis, Energy & Fuels, 29(12): 7800-7806, doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01645.
[7]. Wang, Z., Deng, S., Gu, Q., Cui, X., Zhang, Y., Wang, H. (2014). Subcritical water extraction of Huadian oil shale under isothermal condition and pyrolysate analysis, Energy & fuels, 28(4): 2305-2313, doi.org/10.1021/ef5000062.
[8]. Zhao, L., Yang, D., Kang, Z. Q., & Zhao, Y. S. (2015). Gas generation law of oil shale heated by superheated steam, Journal of Taiyuan University of Technology, 46(3): 323-326.
[9]. Motasemi, F., & Afzal, M. T. (2013). A review on the microwave-assisted pyrolysis technique, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28, 317-330, doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.008.
[10]. Mutyala, S., Fairbridge, C., Paré, J. J., Bélanger, J. M., Ng, S., & Hawkins, R. (2010). Microwave applications to oil sands and petroleum, A review, Fuel Processing Technology, 91(2): 127-135, doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.09.009.
[11]. Chia-lun, J. H. (1979). Online measurements of the fast changing dielectric constant in oil shale due to high-power microwave heating, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 27(1): 38-43, doi:10.1109/TMTT.1979.1129555.
[12]. Qing, W., Liang, Z., Jingru, B., Hongpeng, L., & Shaohua, L. (2011). The influence of microwave drying on physicochemical properties of liushuhe oil shale. Oil Shale, 28(1), doi: 10.3176/oil.2011.1.04.
[13]. Meng, Y., Yan, Y., Jiang, P., Zhang, M., Oladejo, J., Wu, T., & Pang, C. H. (2020). Investigation on breakage behaviour of oil shale with high grinding resistance: A comparison between microwave and conventional thermal processing, Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 107909, doi.org/10.1016/j.cep.2020.107909.
[14]. Chen, J. H., Georgi, D., Liu, H. H., & Lai, B. (2015). Fracturing tight rocks by elevated pore-water pressure using microwaving and its applications, In SPWLA 56th Annual Logging Symposium, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
[15]. Jesch, R. L., Mclaughlin, R. H. (1984). Dielectric measurements of oil shale as functions of temperature and frequency. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, (2): 99-105, doi: 10.1109/TGRS.1984.350600.
[16]. Hakala, J. A., Stanchina, W., Soong, Y., & Hedges, S. (2011). Influence of frequency, grade, moisture and temperature on Green River oil shale dielectric properties and electromagnetic heating processes, Fuel Processing Technology, 92(1): 1-12, doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.08.016.
[17]. Miller, R., Wang, F. D., DuBow, J., & Collins, F. (1978). Mechanical and thermal properties of oil shale at elevated temperatures, In Proc. 11th Oil Shale Symposium, Colorado School of Mines Press, Golden, 135-146.
[18]. Rajeshwar, K., DuBow, J., & Thapar, R. (1980). Radio-frequency electrical properties of Green River oil shales, Canadian Journal of Earth Sciences, 17(9): 1315-1321, doi.org/10.1139/e80-138.
[19]. Chanaa, M. B., Lallemant, M., Mokhlisse, A. (1994). Pyrolysis of Timahdit, Morocco, oil shales under microwave field. Fuel, 73(10), 1643-1649, doi.org/10.1016/0016-2361(94)90145-7.
[20]. Ala, M. A., Kinghorn, R.R.F., & Rahman, M. (1980). Organic geochemistry and source rock characteristics of the Zagros Petroluem Province, Southwest Iran, Journal of Petroleum Geology, 3(1), 61-89, doi.org/10.1111/j.1747-5457.1980.tb01004.x.
[21]. Shekarifard, A., Darybandeh, M., Rashidi, M., Hajian, M., & Roth,J. (2019). Petroleum geochemical properties of the oil shales from the Early Cretaceus Garau Formation, Qalikuh, Zagrros Mountains, Iran, International Journal of Coal Geology, 206, 1-18, doi.org/10.1016/j.coal.2019.03.005.
[22]. Mahbobipour, H., Kamali, M.R., & Solgi, A. (2016). Organic geochemistry and petroleum potential of Early Cretaceous Garau Formation in central part of Lorestan zone, Northwest of Zagros, Iran, Marine and Petroleum Geology, 77, 991–1009, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.004
[23]. Rasouli, A., Shekarifard, A., Jalali Farahani, F., Verşan Kök, M., Daryabandeh, M., & Rashidi, M. (2015). Occurrence of organic-rich deposits (Middle Jurassic to Lower Cretaceous) from Qalikuh locality, Zagros Basin, South-West of Iran: a possible oil shale resource, International Journal of Coal Geology, 143, 34–42, doi.org/10.1016/j.coal.2015.03.010.
[24]. Sarfi, M., Ghasemi-Nejad, E., Mahanipour, A., Yazdi-Moghadam, M., & Sharifi, M. (2014). Integrated biostratigraphy and geochemistry of the lower Cretaceous Radiolarian Flood Zone of the base of the Garau Formation, Northwest of Zagros Mountains, Iran, Arabian Journal of Geosciences, 8(9): 7245–7255.
[25]. Williams, P. T., & Ahmad, N. (1999). Influence of process conditions on the pyrolysis of Pakistani oil shales, Fuel, 78(6): 653-662, doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00190-2.
[26]. Liang, T., Zou, Y. R., Zhan, Z. W., Lin, X. H., & Shi, J. (2020). An evaluation of kerogen molecular structures during artificial maturation. Fuel, 265, 116979, doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116979.

[27]. Huang, Y., Han, X., & Jiang, X. (2016). A tga-ms investigation of the effect of heating rate and mineral matrix on the pyrolysis of kerogen in oil shale. Oil Shale, 33(2): doi: 10.3176/oil.2016.2.03.
[28]. Ishiwatari, M., Ishiwatari, R., Sakashita, H., Tatsumi, T., & Tominaga, H. O. (1991). Pyrolysis of chlorophyll a after preliminary heating at a moderate temperature: implications for the origin of prist-1-ene on kerogen pyrolysis, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 18(3-4), 207-218, doi.org/10.1016/0165-2370(91)87002-4.
[29]. Campbell, J. H., Gallegos, G., & Gregg, M. (1980). Gas evolution during oil shale pyrolysis. 2. Kinetic and stoichiometric analysis. Fuel, 59(10), 727-732, doi.org/10.1016/0016-2361(80)90027-7.
[30]. Wang, S., Liu, J., Jiang, X., Han, X., & Tong, J. (2013). Effect of heating rate on products yield and characteristics of non-condensable gases and shale oil obtained by retorting Dachengzi oil shale. Oil Shale, 30(1): 27, doi: 10.3176/oil.2013.1.04.
[31]. Nazzal, J. M. (2002). Influence of heating rate on the pyrolysis of Jordan oil shale, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 62(2): 225-238, doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00119-X.
[32]. Ping'an, P., Yan, Q., Hui, Z., Dayong, L., Shanwen, Z., Fenggui, S., & Zheng, L. (2008). Kinetics of kerogen transformation by heating in closed system, Marine Origin Petroleum Geology, 2.
[33]. Freund, H., & Kelemen, S. R. (1989). Low-temperature pyrolysis of Green River kerogen. AAPG Bulletin, 73(8): 1011-1017, doi.org/10.1306/44B4A2D5-170A-11D7-8645000102C1865D.
[34]. Kobraei, M., Rabbani, A.R., & Taati, F. (2017). Source rock characteristics of the Early Cretaceous Garau and Gadvan formations in the western Zagros Basin–southwest Iran, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, doi.org/10.1007/s13202-017-0362-y.
[35]. Taheri-Shakib, J., Shekarifard, A., & Naderi, H. (2018d). Characterization of the wax precipitation in Iranian crude oil based on Wax Appearance Temperature (WAT): Part 1. The influence of electromagnetic waves, Journal of Petroleum Science and Engineering, 161, 530-540, doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.012.
[36]. Taheri-Shakib, J., Shekarifard, A., & Naderi, H. (2017a). The experimental investigation of effect of microwave and ultrasonic waves on the key characteristics of heavy crude oil, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 128, 92-101, doi.org/10.1016/j.jaap.2017.10.021.
[37]. Taheri-Shakib, J., Shekarifard, A., & Naderi, H. (2017b). The experimental study of effect of microwave heating time on the heavy oil properties: Prospects for heavy oil upgrading, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 128, 176-186, doi.org/10.1016/j.jaap.2017.10.012.
[38]. Taheri-Shakib, J., Shekarifard, A., Naderi, H., & Hosseini, S. A. (2017c). Effect of microwave irradiation on wax and asphaltene content of heavy crude oil. In 79th EAGE conference and exhibition, 2017(1): 1-5, European Association of Geoscientists & Engineers, doi.org/10.3997/2214-4609.201700699.
[39]. Taheri-Shakib, J., Shekarifard, A., & Naderi, H. (2018e). Heavy crude oil upgrading using nanoparticles by applying electromagnetic technique, Fuel, 232, 704-711, doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.023.
[40]. Taheri-Shakib, J., Shekarifard, A., & Naderi, H. (2018f). The influence of electromagnetic waves on the gas condensate characterisation: experimental evaluation, Journal of Petroleum Science and Engineering, 166, 568-576, doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.078.
[41]. Taheri-Shakib, J., Shekarifard, A., & Naderi, H. (2018a). Experimental investigation of comparing electromagnetic and conventional heating effects on the unconventional oil (heavy oil) properties: Based on heating time and upgrading, Fuel, 228, 243-253, doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.141.
[42]. Worner, H. K., & Burton, P. (1989). Pyrolysis of oil containing shale using microwave irradiation, Australian Patent, (32524/89).
[43]. Taheri-Shakib, J., & Kantzas, A. (2021). A comprehensive review of microwave application on the oil shale: Prospects for shale oil production, Fuel, 305, 121519, doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121519.
[44]. Bridges, J. E., Taflove, A., & Snow, R. H. (1978). Net energy recoveries for the in-situ dielectric heating of oil shale, In Proc., 11th Oil Shale Symposium, Golden, Colorado, 311-330.
[45]. Baker-Jarvis, J., & Inguva, R. (1988). Dielectric heating of oil shales by monopoles and modified coaxial applicators, Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 23(3), 160-170, doi.org/10.1080/08327823.1988.11688051.
[46]. Taheri-Shakib, J., Shekarifard, A., Naderi, H. (2018g). Analysis of the asphaltene properties of heavy crude oil under ultrasonic and microwave irradiation. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 129, 171-180, doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.015.
[47]. Reddy, B. R., Ashok, I., & Vinu, R. (2020). Preparation of carbon nanostructures from medium and high ash Indian coals via microwave-assisted pyrolysis, Advanced Powder Technology, 31(3): 1229-1240, doi.org/10.1016/j.apt.2019.12.017.
[48]. Wang, C. C., Noble, R. D. (1983). Composition and kinetics of oil generation from non-isothermal oil shale retorting. Fuel, 62(5): 529-533, doi.org/10.1016/0016-2361(83)90221-1.

[49]. Noble, R. D., Harris, H. G., & Tucker, W. F. (1981). Isothermal oil shale pyrolysis. 2. Kinetics of product formation and composition at various pressures, Fuel, 60(7): 573-576, doi.org/10.1016/0016-2361(81)90156-3.
[50]. Zojaji, I., Esfandiarian, A., & Taheri-Shakib, J. (2021). Toward molecular characterization of asphaltene from different origins under different conditions by means of FT-IR spectroscopy, Advances in Colloid and Interface Science, 289, 102314, doi.org/10.1016/j.cis.2020.102314.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۷۲-۵۸

ارزیابی وضعیت آلودگی هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات پیرامونی اکوسیستم‌های مرجانی (مطالعه موردی: تالاب بین‌المللی شیدور)

مهدی سلطانی، صابر قاسمی* و احسان کامرانی

گروه محیط زیست، مرکز تحقیقات محیط زیست دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳

چکیده

تالاب‌ها به‌عنوان یکی از زیست‌گاه‌های غنی جهان و تلاقی‌دهنده زیست‌بوم‌های خشکی و دریا نقش مهمی در صیانت از آب، خاک، تنوع زیستی و تصفیه آب دارند. جزیره شیدور به‌دلیل اهمیت جزایر مرجانی به‌عنوان چهارمین تالاب بین‌المللی استان هرمزگان در خلیج‌فارس واقع شده است. تحقیق کنونی با هدف بررسی میزان آلایندگی هیدروکربن‌های نفتی کل (TPHs) در رسوبات پیرامون اکوسیستم‌های مرجانی تالاب شیدور طی خردادماه ۱۴۰۱ انجام شد. براین اساس با توجه به مهم‌ترین مکان‌های پراکنش اکوسیستم‌های مرجانی تالاب، ۳ ایستگاه دریایی انتخاب و نمونه‌های رسوب از عمق حدود ۵-۰ sm بستر دریا توسط چنگک فولادی برداشت شد و در زمان جزر کامل جزیره نیز ۳ ایستگاه ساحلی انتخاب و نمونه‌های رسوب سواحل به‌صورت تصادفی توسط بیلچه جمع‌آوری و پس از انتقال به آزمایشگاه استخراج و اندازه‌گیری غلظت TPHs نمونه‌ها طبق دستورالعمل سنجش هیدروکربن‌های نفتی روش MOOPAM توسط دستگاه UVF برحسب میکروگرم بر گرم وزن خشک رسوب تعیین شد. نتایج به‌دست آمده از آنالیز بافت رسوبات نشان داد در رسوبات دریایی به‌ترتیب بیشترین تا کمترین درصد ذرات دانه‌ریز سیلت و رس در ایستگاه‌های سوم > دوم > اول و در رسوبات ساحلی اول > سوم > دوم مشاهده شد. همچنین محدوده تغییرات ذرات ماسه در رسوبات دریایی از ۵۱/۵۷٪ تا ۵۲/۰۷٪ و در رسوبات ساحلی از ۵۶/۷۶٪ تا ۶۸/۱۵٪ متغیر است. نتایج حاصله بیانگر پایین بودن غلظت TPHs از مقدار زمینه خطر زیست‌محیطی (μg/g ۴) می‌باشد. به‌طور کلی دلیل حضور ترکیبات نفتی در این تالاب را می‌توان همجواری km ۱/۵ این زیست‌بوم طبیعی با جزیره لاوان که از مناطق مهم و چهارگانه عملیات نفتی خلیج‌فارس با تأسیسات عظیم پالایش، حمل و نقل و بارگیری و صدور نفت خام در ارتباط دانست. یافته‌های ارزیابی خطر زیست‌محیطی ناشی از آلودگی هیدروکربن‌های نفتی کل بر آبزیان با استفاده از دستورالعمل‌های کیفیت رسوب و ضریب آلودگی نشان داد که در حال حاضر رسوبات محدوده مطالعاتی خوشبختانه فاقد هرگونه اثر بیولوژیکی نامطلوب بر زندگی موجودات آبزی این منطقه است.

کلمات کلیدی: تالاب شیدور، آبسنگ‌های مرجانی، خلیج‌فارس، آلودگی محیط‌زیست، هیدروکربن‌های نفتی کل (TPHs)

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی s.ghasemi@iau.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.5000.3230)

مقدمه

از میان انواع زیست‌بوم‌های طبیعی، تالاب‌ها به‌دلیل ایفای نقش در حفاظت از تنوع زیستی، کارکردهای طبیعی، اقتصادی و اجتماعی از ارزش بالایی برخوردار می‌باشند. تالاب‌ها جزء پرمولدترین و حاصلخیزترین زیست‌بوم‌های طبیعی زمین هستند [۱]، که نقش به‌سزایی در تنوع زیستی و معیشت انسان‌ها دارند [۲]، آن‌چنان‌که بیش از یک سوم جمعیت جهان در این مناطق به‌سر می‌برند و حدود ۹۰٪ از محصولات شیلاتی نیز از این مناطق در حال تأمین است [۳]. در حال حاضر این زیست‌بوم‌های دارای ارزش‌های اقتصادی، اجتماعی، تفرجی، زیباشناختی تحت فشارهای انسانی، گردشگری نابخردانه، توسعه شهرنشینی، صنعتی شدن، تشدید کشاورزی و بهره‌برداری بیش از حد، حمل و نقل، ریزش و نشت مواد نفتی قرار گرفته‌اند که این امر عملکرد هیدرولوژیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی تالاب‌ها را کاسته است [۴- ۱۰ و ۱۱]. طبق تعریف کنوانسیون رامسر تالاب‌ها شامل نواحی علفزار تالابی، مانداب و توربزارها[1] به‌صورت طبیعی یا مصنوعی، دائمی یا موقت، دارای آب ساکن یا جاری شیرین، لب‌شور و شور و همچنین آن‌دسته از مناطق دریایی می‌باشند که عمق‌شان در هنگام جزر از شش متر تجاوز نکند [۱۲ و ۱۳] که بر همین اساس صخره‌های مرجانی و غارها نیز در این تعریف گنجانده می‌شوند [۱۴]. نقش آبسنگ‌های مرجانی در گردشگری، تأمین غذا، ارائه محصولات طبیعی و غیره برای بشر به اثبات رسیده است [۱۵] و از طرفی، یک زیستگاه امن برای جانداران آبزی است. این زیست‌بوم بسیار غنی که نقش پررنگی در حفاظت از سواحل مرجانی داشته، امروزه جزء حساس‌ترین اکوسیستم‌ها نسبت به آلاینده‌های دریایی می‌باشد. اثرات سوء این آلاینده‌ها، تالاب‌ها را در زمره آسیب‌پذیرترین منابع محیط‌زیست جهانی قرار داده، که در سال‌های اخیر افزایش فعالیت‌های صنعتی و مداخلات انسانی منجر به تخریب سطح عظیمی از تالاب‌ها و کاهش تنوع زیستی در آن‌ها شده است [۱۴ و ۱۶]. گرمایش جهانی، توسعه مدیریت نشده دریا- ساحل، تخریب زیستگاه، بالا رفتن اسیدیته و کاهش کیفیت آب، افزایش فعالیت‌های ماهی‌گیری، شکار بی‌رویه، شیوع بیماری، آلودگی و غیره از مهم‌ترین عوامل کاهش وسعت صخره‌های مرجانی هستند [۱۷ و ۱۸]. سلامت اکوسیستم‌های مرجانی با پارامترهایی همچون شوری، دما و اکسیژن محلول آب همراه با کیفیت رسوبات ارزیابی می‌شود [۱۹]. نوع ساختار رسوبات مکانی مناسب برای تجمع انواع آلاینده‌های آلی، به‌ویژه هیدروکربن‌های نفتی کل (TPHs)[2] است [۲۰]. طبق برآوردها سالیانه حدود ۴/۶۳ میلیون تن نفت خام به طرق مختلف به دریاها تخلیه می‌گردد [۲۱] که با توجه به سمیت، انحلال‌پذیری و آب‌گریزی هیدروکربن‌های نفتی، توانایی بالایی جهت تجمع در رسوبات و زنجیره غذایی دارند [۲۲ و ۲۳]. تأثیر عوامل انسانی در ورود آلاینده‌ها از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای بالادست به دریاها در حال حاضر از ظرفیت‌های فعلی بیشتر اکوسیستم‌های ساحلی برای سازگاری فراتر رفته است که ادامه این روند می‌تواند آلودگی شدید محیطی و تخریب محیط زیست این مناطق را به‌دنبال داشته باشد [۲۴، ۲۵ و ۲۶]. آلودگی رسوبات به TPHs در حال حاضر یکی دیگر از منابع تأثیرگذار در سلامت اکوسیستم‌های مرجانی به‌شمار رفته که این آلاینده‌ها پس از تجمع در رسوبات، توانایی مجدد بازیافت به آب را دارند [۲۷، ۲۸ و ۲۹]. بدین ترتیب ارزیابی ریسک آلودگی رسوبات در زیست‌بوم‌های حساس ساحلی همچون آبسنگ‌های مرجانی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. اجرا و پایش کنوانسیون‌های بین‌المللی حفاظت از محیط‌زیست دریایی نظیر آب توازن کشتی‌ها، مارپول، سیستم‌های مضر ضدخزه

1. Peatland
2. Total Petroleum Hydrocarbons (TPHs)

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۷۲-۵۸

و منطقه‌ای کویت می‌تواند در پیش‌گیری از آلودگی نفتی اکوسیستم‌های مرجانی کمک شایانی کند. امروزه یک نمونه بارز از انطباق آبزیان را در صخره‌های مرجانی خلیج‌فارس می‌توان مشاهده نمود. عمده آبسنگ‌های مرجانی این دریای نیمه بسته به‌صورت تکه‌تکه[1] و حاشیه‌ای[2] است [۳۰] و با نزدیک شدن به سواحل درصد پوشش و تنوع گونه‌ای مرجانی کاهش یافته، که بنا بر تحقیقات نشان داده شده است در حد آستانه شرایط محیطی، بقای مرجان‌ها محدود می‌شود [۳۱]. تأثیر عوامل و فعالیت‌های بشری مانند حمل و نقل دریایی نفت خام و مشتقات آن، تأسیسات اکتشاف و استخراج نفت، گاز و میعانات آن و توسعه روزافزون و نامتوازن شهرهای ساحلی، آبسنگ‌های مرجانی خلیج‌فارس را در معرض نابودی قرار داده و همچنین از وسعت آن‌ها نیز کاسته است [۳۲]. وجود شرایط خاصی هم‌چون درجه حرارت و شوری بسیار زیاد، کدورت بالا، عمق کم و حضور آلاینده‌های مختلف زیست‌محیطی مانند TPHs، اکوسیستم خلیج‌فارس این محیط آبی حساس زیست‌محیطی را به‌شدت تحت تأثیر اثرات سوء ناشی از این آلاینده‌های دریایی قرار داده است. در این راستا، محققین متعددی به بررسی آلایندگی هیدروکربن‌های نفتی در خلیج‌فارس پرداخته‌اند. سید هشترودی و همکاران [۳۳] مشاهده غلظت‌های هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی[3] به میزان ng/g ۹۴-۲۳ در رسوبات و ng/g ۱۲۳-۳۳ در مرجان *Acropora downingi* را ناشی از احتراق ترکیبات نفتی ارزیابی نمودند. در مطالعات میروکیلی و حاجی زاده ذاکر [۳۴] نیز منشاء TPHs بالاتر تا میزان µg/g ۵۶۲۴ در رسوبات ساحلی نزدیک به پایانه‌های نفتی جزیره خارک در مقایسه با غلظت‌های جزئی‌تر در مناطق دورتر از تأسیسات نفتی این جزیره را سوخت‌های فسیلی دانستند. در خلیج‌فارس بالغ بر ۲۰۰ جزیره وجود دارد [۳۵] که عدم شناخت صحیح از پتانسیل‌های منطقه در اشکال مختلف توسعه، رسوبات، جزایر و اکوسیستم‌های آبی این خلیج را تحت تأثیر اثرات سوء آلاینده‌های نفتی قرار داده است [۳۳]. تالاب بین‌المللی و منطقه حفاظت شده آبسنگ‌های مرجانی شیدور، به‌دلیل نزدیکی و همجواری با تأسیسات نفتی جزیره لاوان و همچنین تردد رو به افزایش قایق‌های صیادی و گردشگری در معرض آلودگی‌های مختلف از جمله آلودگی نفتی قرار دارد. با توجه به آن‌که تاکنون مطالعه‌ای درباره میزان آلودگی نفتی همزمان رسوبات ساحلی و دریایی این جزیره غیرمسکونی انجام نشده است؛ ازاین‌رو هدف پژوهش کنونی بررسی هیدروکربن‌های نفتی کل (TPHs) در رسوبات پیرامونی تالاب بین‌المللی شیدور و همچنین ارزیابی شدت و خطر زیست‌محیطی آلودگی ناشی از حضور این آلاینده در رسوبات ساحلی و دریایی این جزیره مرجانی واقع در شمال خلیج‌فارس است.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی تحقیق جزیره شیدور می‌باشد. جزیره شیدور در فاصله حدود km ۱/۵ شرق جزیره لاوان (یکی از مناطق مهم عملیات نفتی کشور و دارای تأسیسات عظیم پالایش و صادرات نفت خام در خلیج‌فارس) و در km ۱۷۰ شهرستان بندرلنگه واقع شده است. این منطقه به‌دلیل اهمیت جزایر مرجانی با وسعت ۸۷۰ هکتار به‌عنوان چهارمین تالاب بین‌المللی استان هرمزگان در کنوانسیون رامسر به ثبت رسیده است و ۹۸ هکتار آن (بخش خشکی) نیز به‌عنوان پناهگاه حیات وحش (پرندگان، لاک‌پشت‌های دریایی، ماهی‌ها و دلفین‌ها) مورد حفاظت قرار دارد. سواحل این جزیره محیط مناسبی برای تخم‌گذاری لاک‌پشت دریایی منقار عقابی محسوب می‌گردد.

1. Patch Reef
2. Fringing Reef
3. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)

از طرفی این تالاب توسط مؤسسه بین‌المللی حیات پرندگان به‌عنوان یکی از مناطق مهم تجمع پرندگان (IBAs)[1] شناخته شده است. همچنین این جزیره در فهرست مهم‌ترین آبسنگ‌های مرجانی اتحادیه جهانی حفاظت از طبیعت (IUCN)[2] نیز ثبت شده است [۳۶]. عمده آبسنگ‌های مرجانی جزیره شیدور را مرجان‌های حاشیه‌ای تشکیل داده‌اند [۳۷].

روش کار

پس از بازدید میدانی از منطقه مطالعاتی و طی عملیات غواصی، ۳ ایستگاه دریایی در مهم‌ترین مکان‌های پراکنش اکوسیستم‌های مرجانی (اعماق کمتر از ۶ m) تالاب بین‌المللی شیدور به‌صورت تصادفی انتخاب و مختصات آن‌ها توسط GPS تعیین، ثبت و از الگوی ترانسکت برای نمونه‌برداری تصادفی استفاده گردید جدول ۱ و در ادامه از عمق حدود ۵-۰ cm بستر با ۳ تکرار نمونه‌های رسوب توسط چنگک فولادی ضدزنگ ون‌وین[3] از هر ایستگاه دریایی جمع‌آوری شدند. سپس در زمان جزر کامل جزیره ۳ ایستگاه در سواحل جزیره شیدور به‌طور تصادفی انتخاب شد و توسط یک بیلچه استیل نمونه‌های رسوب ساحل نیز با ۳ تکرار و با استفاده از یک کوادرات $۲۰×۲۰ cm^2$ از عمق حدود ۵-۰ cm برداشت و در ظروف آلومینیومی نگهداری و توسط یخدان به آزمایشگاه اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان هرمزگان منتقل شدند. نمونه‌های موجود در آزمایشگاه ۳ شبانه‌روز در دمای تقریباً ۱۵ ˚C نگهداری شدند و به‌منظور استخراج و اندازه‌گیری غلظت TPHs نمونه‌ها مطابق دستورالعمل سنجش هیدروکربن‌های نفتی روش MOOPAM در ابتدا به میزان ۲۰ g از نمونه‌هایی که توسط خشک‌کن انجمادی[4] تحت خلاء و برودت ۵۰˚C- خشک شده را به‌کمک هاون چینی همگن و در ویال دستگاه مایکروویو قرار داده و به آن‌ها ۴۰ mL حلال‌های هگزان نرمال و دی کلرومتان (نسبت ۱ : ۱) نیز اضافه گردید. پس از قرار دادن درپوش و روپوش مخصوص، ظروف نمونه‌ها برای قرار گرفتن در دستگاه مایکروویو آماده شدند. در گام بعدی، نمونه‌های آماده‌سازی شده را درون دستگاه قرار داده و با استفاده از LCD مخصوص دستگاه، برنامه مورد نیاز برای انجام مرحله استخراج به‌دستگاه داده شد. مشخصات دستگاه برای استخراج هیدروکربن‌های نفتی از نمونه‌های رسوبات به‌شرح زیر است :

- ← قدرت مایکروویو ۱۲۰۰ W
- ← افزایش دما تا ۱۱۵ ˚C در ۱۰ min
- ← ادامه استخراج در دمای ۱۱۵ ˚C در ۲۰ min

پس از سرد شدن کامل نمونه‌ها و رسیدن به دمای محیط، آن‌ها را از کاغذ صافی عبور داده و درون ظروف شیشه‌ای ریخته شد. رسوبات باقی‌مانده در ویال با ۱۰ mL هگزان شستشو و سپس به ظروف شیشه‌ای منتقل گردید.

جدول ۱ مختصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری از رسوبات دریایی و ساحلی منطقه مورد مطالعه*

محدوده مطالعاتی	ایستگاه	رسوبات دریایی		رسوبات ساحلی		توضیحات
		UTM		UTM		
		X	Y	X	Y	
جزیره شیدور	۱ A	۷۳۹۶۶۷	۲۹۶۶۱۶۹	۷۳۹۹۷۱	۲۹۶۵۸۹۳	گردشگری ساحلی و دریایی، صیادی و غواصی
	۲ B	۷۴۰۳۲۲	۲۹۶۵۳۶۴	۷۴۰۱۶۹	۲۹۶۵۲۳۰	
	۳ C	۷۳۸۸۴۸	۲۹۶۴۷۳۱	۷۳۹۳۰۰	۲۹۶۵۳۵۱	

* عمق نمونه‌برداری از رسوبات دریایی در ایستگاه‌ها (A : ۱۶۰ cm، B: ۲۰۰ cm و C: ۴۵۰ cm)

1. Important Bird and Biodiversity Areas (IBAs)
2. The International Union for Conservation of Nature (IUCN)
3. Van Veen Grab
4. Freeze Dryer

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۷۲-۵۸

برای ممانعت از تبخیر حلال‌های مورد استفاده، نمونه‌ها تا انجام مراحل بعدی اندازه‌گیری، در دمای ۳ ˚C نگهداری شدند. در مرحله بعد نمونه استخراج شده با دستگاه تبخیرکننده گردشی[1] تا حجم ۱۵ mL تغلیظ گردید و در نهایت نمونه تغلیظ شده توسط جریان ملایمی از گاز نیتروژن خشک و تمیز با درجه خلوص (۹۹/۹۹٪)، به حجم ۲ mL رسانده شد. لازم است دستگاه تبخیرکننده گردشی با دور ۳۰ rpm تنظیم و دمای حمام نیز بیش از ۳۰ ˚C نباشد. در این مرحله (اندازه‌گیری) جهت سنجش عملکرد ارزیابی دستگاه مورد استفاده و همچنین کنترل کیفیت (بهبود درصد استخراج)، ابتدا به‌دستگاه غلظت‌های مختلفی از محلول استاندارد (محلول کرایزن) داده شد که دستگاه این میزان جذب را با رسم یک منحنی کالیبراسیون نشان داد و سپس غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل توسط دستگاه فلوئورسانس اشعه ماورای بنفش[2] با طول موج ۳۱۰ nm و طول موج انتشار ۳۶۰ nm با ۲ بار تکرار برحسب واحد نانوگرم بر میلی‌لیتر (ppb) قرائت و در نهایت مقدار آن برحسب میکروگرم بر گرم (µg/g) وزن خشک رسوب محاسبه شد [۳۸]. در پژوهش حاضر درصد خطای کلیه آنالیزهای صورت گرفته برای هر نمونه در سطح معناداری ۹۵٪ محاسبه گردید. در ادامه کارهای آزمایشگاهی از سری الک‌های با مش ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۶۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۷۰ و ۲۳۰ به‌منظور تعیین دانه‌بندی رسوبات دریایی و ساحلی استفاده شد. برای این کار در ابتدا مقداری از نمونه رسوب داخل ظرف استوانه‌ای ۵۰۰ cc قرار داده شد و سپس برای از بین بردن ماده آلی مقداری آب اکسیژنه به آن افزودیم. در مرحله بعد ظرف استوانه‌ای به‌مدت ۴۸ h داخل آون با دمای ۷۰ ˚C جهت خشک شدن قرار داده شد. پس از آن رسوب را وزن کرده و داخل الک‌هایی که برروی هم از بالا به پایین روی دستگاه لرزاننده قرار گرفته‌اند به‌مدت ۱۵ min ریخته شده تا توسط لرزش‌های صورت گرفته جداسازی و عمل دانه‌بندی انجام شود. در مرحله بعد الک‌ها را از روی لرزاننده الک جدا و مقدار رسوبات باقی‌مانده داخل هر الک را توزین نموده و در نهایت درصد انواع رسوبات مشخص شد. کلیه آنالیزهای ذکر شده در بالا برای هر نمونه به‌صورت سه بار تکرار صورت گرفت [۳۸]. شکل ۱ محدوده مطالعاتی و ایستگاه‌های نمونه‌برداری پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

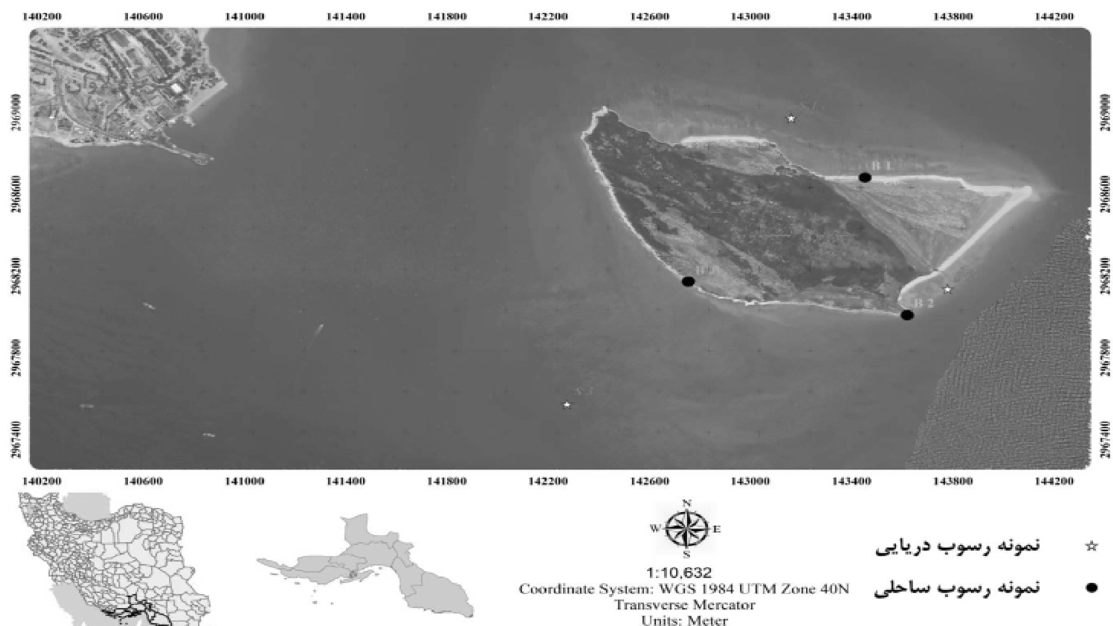
ارزیابی شدت آلودگی در رسوبات

به‌منظور ارزیابی شدت و خطر زیست‌محیطی جهت بررسی اثرات بیولوژیکی نامطلوب و یا درجه سمیت رسوبات به آلاینده‌های نفتی از دو شاخص دستورالعمل‌های استانداردهای کیفیت رسوب[3] و ضریب آلودگی[4] در این مطالعه استفاده شد. برای ارزیابی کیفیت رسوب با استفاده از رابطه ۱، ارتباط بین غلظت آلاینده در نمونه رسوب و اثرات بیولوژیکی نامطلوب بررسی شد.

$$PEL_q = \left(\frac{C}{P}\right) \quad (1)$$

در رابطه ۱، PELq بیانگر مقدار سمیت هیدروکربن‌های نفتی، C نشان‌دهنده غلظت هیدروکربن‌های نفتی موجود در نمونه‌های رسوبی (µg/g) و P نیز بیانگر مقدار PEL برحسب µg/g است. رابطه فوق براساس مقادیر مشخصی از دامنه اثر کم یا حد تأثیر آستانه (TEL) و دامنه اثر متوسط و یا حد اثرات احتمالی (PEL) است. TEL غلظت آلاینده با یک اثر نسبتاً پایین در جوامع زیستی و PEL بیانگر غلظت آلاینده با اثرات سمی می‌باشد [۳۹]. لانگ و همکاران [۴۰] میزان هیدروکربن‌های نفتی کل را در رسوبات خلیج‌فارس به چهار دسته تقسیم نمودند. در این تقسیم‌بندی مقادیر TPHs کمتر از ۱۰ µg/g به‌عنوان زمینه طبیعی (TEL) و مقادیر بالاتر از ۵۰۰ µg/g به‌عنوان PEL در نظر گرفته شد.

1. Rotary Evaporator
2. Ultraviolet Fluorescence Spectroscopy (UVF)
3. Sediment Quality Guidelines (SQGs)
4. Contamination Factor (C_f)



شکل ۱ محدوده مطالعاتی

براساس این ضریب منظمی تهرانی و همکاران [۳۹]، درجه‌بندی اثرات زیستی TPHs در رسوبات را برای آبزیان مطابق جدول ۲ ارائه نمودند. سپس ضریب آلودگی رسوبات با استفاده از رابطه ۲ به‌منظور بررسی آلودگی محیط‌زیست نسبت به یک ماده آلاینده خاص محاسبه شد [۴۱].

$$C_f = \left(\frac{C_{0-1}}{C_n}\right) \quad (۲)$$

در رابطه بالا C_f بیانگر ضریب آلودگی، C_{0-1} نشان‌دهنده میانگین غلظت TPHs در نمونه‌های رسوبی (μg/g) و C_n غلظت TPHs در رسوبات طبیعی (μg/g) است. براساس رابطه ۲، درجه آلودگی به ۴ گروه تقسیم‌بندی می‌شود (جدول ۳): تجزیه و تحلیل‌های آماری تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ و ترسیم نمودارها نیز با نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

ازآنجائی‌که عمق آب نمونه‌برداری پژوهش حاضر در رسوبات دریایی محدوده پراکنش آبسنگ‌های مرجانی جزیره شیدور در کمتر از ۶ m قرار داشته، براین اساس و طبق تعریف کنوانسیون رامسر محدوده مطالعاتی رسوبات دریایی نیز جزء تالاب‌ها درنظر گرفته شد [۱۳].

بافت نمونه‌های رسوب

از جمله پارامترهایی که در تمرکز و انباشت آلاینده‌ها نقش داشته، نوع بافت رسوبات است. معمولاً پس از آن‌که ترکیبات نفتی به ذرات رسوبی می‌چسبند، رسوب‌گذاری پدید می‌آید. با توجه به این‌که مناطق کم‌عمق ساحلی عموماً مملو از مواد معلق‌اند، به‌همین دلیل شرایط رسوب‌گذاری برای ترکیبات نفتی مطلوب است [۲۰ و ۴۲]. در جدول ۴ نتایج دانه‌بندی رسوبات دریایی و ساحلی تالاب بین‌المللی شیدور آورده شده است. نتایج میانگین روند تغییرات از بیشترین تا کمترین درصد ذرات دانه‌ریز سیلت و رس بافت تشکیل‌دهنده رسوبات دریایی به‌ترتیب در ایستگاه‌های سوم > دوم > اول و این محدوده برای ذرات ماسه از ۵۱/۵۷٪ تا ۵۲/۰۷٪ متغیر بود. بیشترین میانگین درصد سیلت و رس بافت تشکیل‌دهنده رسوبات ساحلی در ایستگاه اول به‌میزان ۴۳/۲۴٪ و کمترین آن نیز در ایستگاه شماره دو با ۳۱/۸۵٪ است.

جدول ۲ رده‌بندی اثر سمیت هیدروکربن‌های نفتی بر موجودات آبزی [۹۳]

$PEL_q > ۱/۵$	$۰/۵ < PEL_q > ۱/۵$	$۰/۱ < PEL_q > ۰/۵$	$PEL_q < ۰/۱$	PEL_q
شدید	متوسط	کم	بدون اثر	شدت اثر نامطلوب

جدول ۳ رده‌بندی درجه آلودگی هیدروکربن‌های نفتی براساس ضریب آلودگی [۱۴]

$C_f > ۶$	$۳ \leq C_f > ۶$	$۱ \leq C_f > ۳$	$C_f < ۱$	C_f
زیاد	قابل توجه	متوسط	کم	درجه آلودگی

جدول ۴ مقادیر میانگین دانه‌بندی در نمونه‌های مطالعاتی

محدوده مطالعاتی	رسوبات دریایی			رسوبات ساحلی		
	ایستگاه	ماسه (٪)	سیلت+رس (٪)	ایستگاه	ماسه (٪)	سیلت+رس (٪)
جزیره شیدور	۱	۵۲/۰۷	۴۷/۹۳	۱	۵۶/۷۶	۴۳/۲۴
	۲	۵۲/۰۲	۴۷/۹۸	۲	۶۸/۱۵	۳۱/۸۵
	۳	۵۱/۵۷	۴۸/۴۳	۳	۶۱/۹۹	۳۸/۰۱
	میانگین	۵۱/۸۹	۴۸/۱۱	میانگین	۶۲/۳۰	۳۷/۷۰

همچنین برای درصد ذرات تشکیل‌دهنده ماسه میانگین این تغییرات از بیشترین تا کمترین میزان آن به‌ترتیب در ایستگاه‌های دوم > سوم > اول است. با توجه به بستر صخره‌ای - شنی [۳۶] و عمق کم آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری اول (۱۶۰ cm)، دوم (۲۰۰ cm) و سوم (۴۵۰ cm) از رسوبات دریایی پیرامون آبسنگ‌های مرجانی، وجود تفاوت‌های مشاهده شده در میانگین دانه‌بندی رسوبات دریایی تالاب توجیه‌پذیر است. از طرفی نوع دانه‌بندی رسوبات دریایی کم‌عمق جزیره در محدوده مطالعاتی را می‌توان برگرفته از آب‌شویی بافت ماسه‌ای و رسوبات ساحلی آن دانست که با نوع بافت رسوبات معرفی شده این تالاب توسط عسکری حصنی و همکاران [۳۶] نیز همخوانی دارد.

غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوب

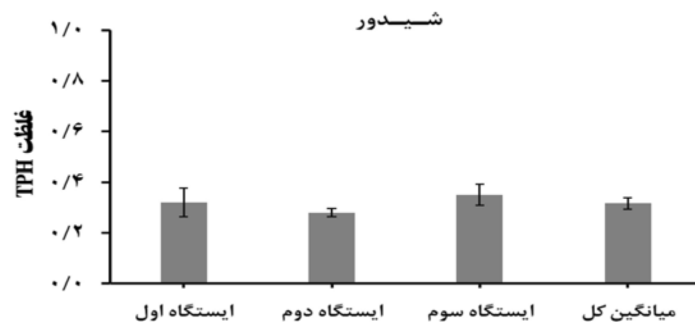
نتایج حاصل از غلظت TPHs موجود در رسوبات دریایی و ساحلی در جدول ۵ آورده شده است. نتایج بیانگر آن بود که بیشترین میانگین غلظت TPHs در رسوبات دریایی ایستگاه شماره سه به‌میزان ۰/۳۵ µg/g و کمترین میانگین غلظت در ایستگاه شماره دو به‌میزان ۰/۲۸ µg/g اندازه‌گیری شد. همچنین در رسوبات ساحلی نیز محدوده میانگین هیدروکربن‌های نفتی کل از بیشترین تا کمترین غلظت به‌ترتیب در ایستگاه‌های دوم > اول > سوم مشاهده شد. لازم به ذکر است در پژوهش حاضر به‌دلیل آن‌که در جزیره خالی از سکنه شیدور منبع مهم و تأثیرگذاری جهت ورودی و محاسبه میزان کل ماده آلی (TOM) محیط‌های آبی پیرامونی مشاهده و گزارش نشده است، از بررسی نقش و تأثیر آن در رسوبات محدوده مطالعاتی صرف‌نظر شد. در شکل‌های ۲ و ۳ مقادیر TPH در رسوبات دریایی و ساحلی نشان داده شده است.

همبستگی داده‌ها

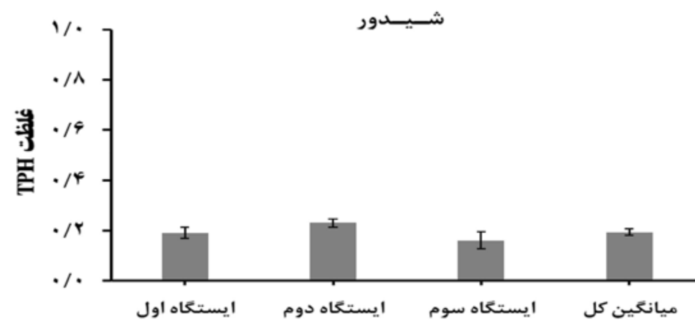
به‌منظور تعیین رابطه آماری غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل و دانه‌بندی رسوبات از روش همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون همبستگی نشان داد که بین TPHs موجود در رسوبات دریایی و ساحلی با نوع بافت رسوبات (اندازه ذرات رسوبی) ارتباط معناداری وجود ندارد.

جدول ۵ مقادیر میانگین± انحراف‌معیار هیدروکربن‌های نفتی کل در نمونه‌های مطالعاتی

محدوده مطالعاتی	رسوبات دریایی		رسوبات ساحلی	
	ایستگاه	غلظت TPH (μg/g)	ایستگاه	غلظت TPH (μg/g)
جزیره شیدور	۱	۰/۳۲±۰/۱۰	۱	۰/۱۹±۰/۰۴
	۲	۰/۲۸±۰/۰۳	۲	۰/۲۳±۰/۰۳
	۳	۰/۳۵±۰/۰۷	۳	۰/۱۶±۰/۰۶
	میانگین کل (n=۹)	۰/۳۲±۰/۰۷	میانگین کل (n=۹)	۰/۱۹±۰/۰۴



شکل ۲ مقادیر غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات دریایی محدوده مورد مطالعه



شکل ۳ مقادیر غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات ساحلی محدوده مورد مطالعه

در ادامه بررسی‌ها به‌منظور ارزیابی آلودگی نفتی رسوبات از شاخص‌های دستورالعمل کیفیت رسوب و ضریب آلودگی استفاده شد.

دستورالعمل‌های استاندارد کیفیت رسوبات

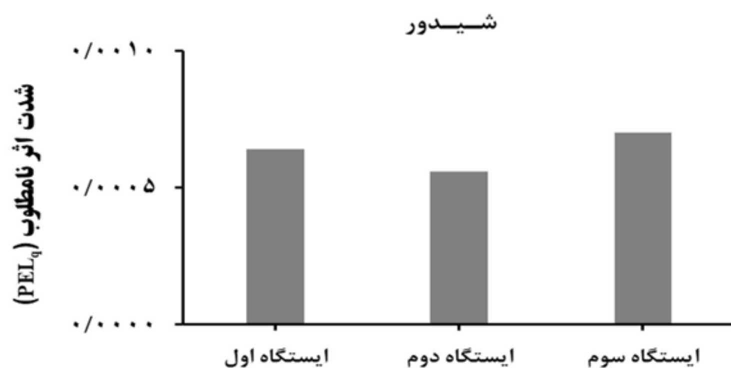
بر طبق محاسبات انجام گرفته، به‌منظور ارزیابی کیفیت رسوبات و اثرات بیولوژیک هیدروکربن‌های نفتی کل روی موجودات آبزی مقدار μg/g ۵۰۰ در رابطه ۱ به‌عنوان PEL در نظر گرفته شد، که براساس جدول ۲ غلظت TPH در تمام رسوبات ایستگاه‌های محدوده مورد مطالعه فاقد هرگونه اثرات نامطلوب بیولوژیکی بر زندگی آبزیان است (شکل‌های ۴ و ۵).

ضریب آلودگی

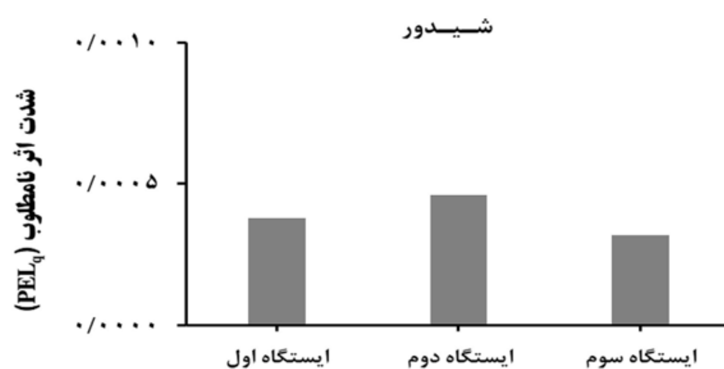
با توجه به محاسبات صورت گرفته طبق رابطه ۲ و جدول ۳ درجه آلودگی در کلیه رسوبات ایستگاه‌های دریایی و ساحلی تالاب مورد مطالعه در رده آلودگی کم قرار دارد (شکل‌های ۶ و ۷).

مقایسه نتایج میانگین TPH در رسوبات مورد مطالعه با میانگین خلیج‌فارس و جهان

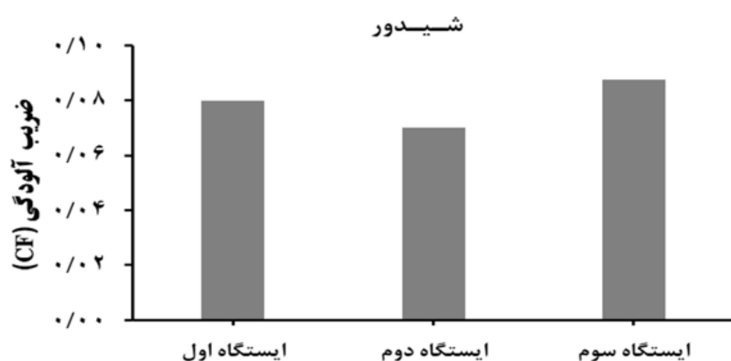
گولدبرگ [۴۳] در مطالعات خود غلظت TPHs در رسوبات دریایی را مطابق جدول ۶ به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی نمود.



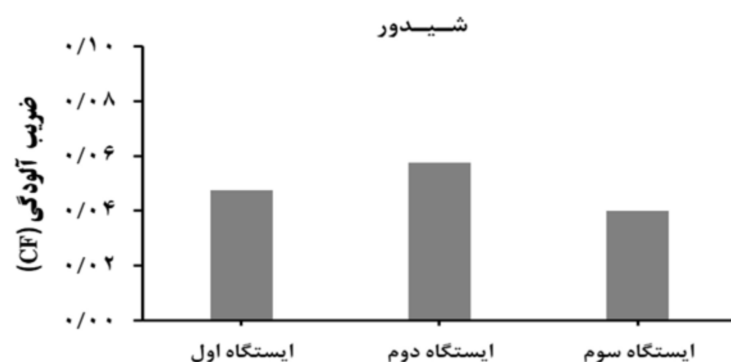
شکل ۴ نتایج حاصل از ارزیابی کیفیت رسوبات دریایی به TPHs در محدوده مورد مطالعه



شکل ۵ نتایج حاصل از ارزیابی کیفیت رسوبات ساحلی به TPHs در محدوده مورد مطالعه



شکل ۶ نتایج حاصل از ضریب آلودگی رسوبات دریایی به هیدروکربن‌های نفتی کل در محدوده مورد مطالعه



شکل ۷ نتایج حاصل از ضریب آلودگی رسوبات ساحلی به هیدروکربن‌های نفتی کل در محدوده مورد مطالعه

جدول ۶ تقسیم‌بندی مناطق براساس غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل [۳۴]

وضعیت رسوبات	مقادیر TPH (µg/g)
رسوبات اقیانوسی غیر آلوده	۱ - ۴
رسوبات ساحلی با آلودگی متوسط	< ۱۰۰
رسوبات خیلی آلوده	> ۱۲۰۰۰

بر مبنای پژوهش‌های انجام گرفته توسط مسعود و همکاران [۴۴] غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات خلیج‌فارس برابر جدول ۷ به چهار گروه طبقه‌بندی شدند. براساس طبقه‌بندی صورت گرفته غلظت µg/g ۱۰-۱۵ به‌عنوان غلظت استاندارد هیدروکربن‌های نفتی کل در خلیج‌فارس است.

جدول ۷ طبقه‌بندی مناطق براساس غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل [۴۴]

درصد آلودگی منطقه	مقادیر TPH (µg/g)
غیر آلوده (مقدار زمینه)	۱۰ - ۱۵
آلودگی کم	۱۵ - ۵۰
آلودگی متوسط	۵۰ - ۲۰۰
آلودگی شدید	> ۲۰۰

با توجه به تقسیم‌بندی‌های صورت گرفته در مطالعات گولدبرگ [۴۳] و مسعود و همکاران [۴۴] تمامی ایستگاه‌های محدوده مورد مطالعه (رسوبات دریایی و ساحلی) در دسته مناطق غیر آلوده به TPHs قرار دارند (جدول ۸).

جدول ۸ مقایسه میانگین غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات دریایی محدوده مورد مطالعه با میانگین غلظت استاندارد آن در رسوبات جهانی و رسوبات خلیج‌فارس.

محدوده مورد مطالعه در پژوهش حاضر	میانگین غلظت (µg/g)TPH
جزیره شیدور	۰/۳۲
میانگین غلظت استاندارد TPH در رسوبات دریایی جهان [۴۳]	۴
میانگین غلظت استاندارد TPH در رسوبات دریایی خلیج فارس [۴۴]	۱۰

بر طبق تقسیم‌بندی دیگری که توسط کامندیتور و استیوز [۴۵] ارائه شد، شدت آلودگی رسوبات مناطق ساحلی به TPHs به سه گروه تقسیم‌بندی شدند (جدول ۹). براساس دسته‌بندی‌های صورت گرفته توسط کامندیتور و استیوز [۴۵]، در حال حاضر شدت آلودگی به TPHs در تمامی ایستگاه‌های رسوبات ساحلی تالاب بین‌المللی شیدور از آلودگی کمی برخوردار است (جدول ۱۰). نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر و مقایسه آن‌ها با تقسیم‌بندی‌های صورت گرفته در مطالعات گولدبرگ [۴۳] مسعود و همکاران [۴۴]، کامندیتور و استیوز [۴۵] و بررسی‌های میروکیلی و حاجی زاده ذاکر [۳۴] همخوانی دارد.

جدول ۹ دسته‌بندی رسوبات مناطق ساحلی به آلودگی هیدروکربن‌های نفتی کل [۴۵]

شدت آلودگی	میزان TPH (µg/g)
کم	TPH > ۱۰
کم تا متوسط	۱۰ ≥ TPH > ۱۰۰
متوسط تا زیاد	۱۰۰ ≥ TPH > ۱۰۰۰

جدول ۱۰ مقایسه میانگین غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات ساحلی محدوده مورد مطالعه با میانگین غلظت استاندارد آن در رسوبات مناطق ساحلی جهان

محدوده مورد مطالعه در پژوهش حاضر	میانگین غلظت (µg/g)TPH
جزیره شیدور	۰/۱۹
میانگین غلظت استاندارد TPH در رسوبات مناطق ساحلی جهان [۴۵]	۱۰

نتیجه‌گیری

متأسفانه دریاهای جهان در دهه‌های اخیر به‌عنوان مدفن آلاینده‌ها، به‌ویژه آلاینده‌های نفتی از سوی انسان است و خلیج‌فارس آبراه مهم و استرتژیک انرژی در جهان نیز از این قاعده مستثنی نیست [۴۶]. افزون برآن خلیج‌فارس با طیف وسیعی از تهدیدهای زیست‌محیطی دیگر از جمله تخلیه مستقیم مواد از رودخانه‌ها و رواناب‌ها، انواع آلاینده‌های خانگی و صنعتی نیز مواجه است که این چالش‌های عموماً انسان‌ساخت بخش اعظمی از زیست‌بوم‌های حساس این دریای نیمه بسته از جمله آبسنگ‌های مرجانی را در حد آستانه‌ی شرایط محیطی خود قرار داده است. بنا بر نتایج به‌دست آمده یکی از دلایل عمده و اصلی حضور TPHs در رسوبات تالاب بین‌المللی شیدور را می‌توان فاصله نزدیک (۱/۵ km) و همجواری این منطقه حفاظت شده با تأسیسات عظیم پالایش، حمل و نقل، بارگیری و صدور نفت خام در جزیره لاوان به‌عنوان یکی از مناطق مهم چهارگانه عملیات نفتی خلیج‌فارس برشمرد [۴۷] که با بررسی‌های میروکیلی و حاجی‌زاده ذاکر [۳۴] در رسوبات جزیره خارک مطابقت دارد. تحقیقات نشان داده است که مجاورت اکوسیستم‌های مرجانی با تأسیسات نفتی، تخلیه آب توازن و سوخت قاچاق به دریاها یا نزدیکی به اسکله‌ها (صیادی و تجاری) نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل حضور ترکیبات نفتی در این اکوسیستم‌ها باشد [۴۲، ۴۸ و ۴۹]، به‌علاوه آن‌که می‌دانیم آلودگی نفتی دریاها به‌طور عمده توسط تخلیه غیرقانونی هیدروکربن‌ها از جانب کشتی‌ها به محیط‌زیست دریایی رخ می‌دهد [۵۰]. محبی نوذر و همکاران [۵۱] در بررسی دلایل حضور TPH جنگل‌های حرای لافت در خلیج‌فارس، نزدیکی مانگروها به منشاء آلودگی را مهم‌ترین عامل حضور هیدروکربن‌ها دانستند، لذا سطح بالاتر غلظت TPHs در ایستگاه سوم رسوبات دریایی را نیز می‌توان ناشی از نزدیکی فاصله این ایستگاه تا جزیره نفتی لاوان دانست. براساس نتایج به‌دست آمده و مطالعات انجام گرفته توسط محمدی گلنگش و همکاران [۵۲] تفاوت در غلظت پایین‌تر هیدروکربن‌های نفتی کل رسوبات ساحلی در مقایسه با رسوبات دریایی را عمدتاً می‌توان به‌دلیل فرآیندهای مختلف نوری، فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی دانست، زیرا این فرآیندها از توانایی تجزیه این آلاینده‌های آلی برخوردارند. آب‌شویی ناشی از بارندگی، انرژی امواج، جریانات آبی و جزر و مدی، نوع رسوب و میزان ذرات معلق محیط‌های آبی [۱] در محدوده‌ی این تالاب نیز می‌تواند یکی دیگر از عوامل مؤثر در توزیع و بالاتر بودن میانگین غلظت TPHs در رسوبات دریایی نسبت به رسوبات ساحلی باشد. از سویی با توجه به درصد بالاتر ذرات ماسه در مقایسه با ذرات دانه‌ریز سیلت و رس رسوبات این تالاب، کاهش بار آلودگی نفتی در رسوبات پیرامونی اکوسیستم‌های مرجانی این جزیره توجیه‌پذیر است که با نتایج سیلوا و همکاران [۵۳] در بررسی رسوبات سطحی خلیج تودوس سانتوس برزیل مطابقت داشت. عمق کم آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری از رسوبات دریایی آبسنگ‌های مرجانی نیز می‌تواند یکی دیگر از عوامل حضور TPHs باشد که با نتایج الولاد و همکاران در نیجریه همخوانی دارد [۵۴] و شاید یکی از دلایل میزان پایین‌تر از حد استاندارد TPH رسوبات شیدور در مقایسه با میانگین جهانی و متوسط آن در خلیج‌فارس، پراکنش آبسنگ‌های این تالاب در اعماق زیر ۶ m و قرار گرفتن آن‌ها در نواحی ساحلی نمونه‌برداری باشد، چراکه میزان آلودگی نفتی کمتر در نواحی ساحلی به‌دلیل کم‌بودن میزان کربن آلی در پژوهش‌های محبی نوذر و همکاران [۵۱] در رویشگاه‌های مانگرو خلیج‌فارس نیز گزارش شده که با این نتایج همخوانی دارد و دلیل دیگر آن هم می‌تواند گرمای فصل نمونه‌برداری باشد، زیرا تجزیه زیستی هیدروکربن‌ها در طول فصل گرم با افزایش دما و بالا رفتن میزان اکسیژن حل شده در آب، با سرعت

بیشتری انجام و درنتیجه غلظت آن‌ها نیز کمتر می‌شود که با نتایج ال‌ایماره و همکاران [۵۵] در رودخانه شط‌العرب عراق، لی و همکاران [۵۶] در خلیج بوهای چین و مکتوف و همکاران [۴۸] در رودخانه الناصریه عراق مطابقت دارد. در کل با توجه به آن‌که در خود تالاب منبع و ورودی مستقیم آلودگی وجود نداشت، غلظت هیدروکربن‌های نفتی مشاهده شده در منطقه مطالعاتی مطابق پژوهش‌های متوالی و همکاران [۵۷] احتمالاً به ویژگی‌های رسوبی وابسته نبوده بلکه تابع مجاورت و نزدیکی به منشاء آلودگی نفتی مانند جزیره لاوان باشد. به‌منظور صیانت از اکوسیستم آبسنگ‌های مرجانی تالاب بین‌المللی شیدور که جزء یکی از زیست‌بوم‌های آسیب‌پذیر محیط‌زیست خلیج‌فارس در استان هرمزگان به‌شمار می‌روند، لزوم برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌هایی نظیر مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی- دریایی به‌ویژه در تالاب‌های ساحلی- دریایی ضمن بهره‌گیری از ظرفیت‌های جوامع بومی- محلی در جهت حفظ، حراست و احیای تالاب‌ها با رویکرد توسعه پایدار نمایان‌تر می‌گردد که با توجه به وقایع مختلف زیست‌محیطی خصوصاً آلودگی‌های نفتی و نیاز بخش‌های تحقیقاتی و اجرایی کشور به تغییرات و نوسانات خصوصیات محدوده آب‌های ایران در خلیج‌فارس، ارزیابی‌های مشابه و استمرار آن در قالب طرح‌های پایش در سایر زیست‌بوم‌های حساس آبی خلیج‌فارس و ضرورت اجرای اثربخش کنوانسیون‌های بین‌المللی مصوب در راستای حفاظت از محیط‌زیست دریایی این خلیج و کاهش بار آلایندگی ترکیبات نفتی آن پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر مستخرج از رساله دکتری تخصصی رشته مدیریت محیط‌زیست با موضوع بررسی هیدروکربن‌های نفتی کل (TPHs) در رسوبات جزایر خلیج‌فارس محدوده استان هرمزگان می‌باشد. بدین‌وسیله از حسن مساعدت‌های حوزه معاونت پژوهشی و مسئول محترم آزمایشگاه‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس جناب آقای مهندس باقری و سرکار خانم دکتر احسان‌پور کارشناس محترم مرکز سنجش آلودگی و امور آزمایشگاه‌های محیط‌زیست هرمزگان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

[1]. Ghermandi, A., Van den Bergh, J. C. J. M., Brander, L. M., Nunes, P. A. L. D. (2008) The economic value of wetland conservation and creation: a meta-analysis, FEEM Working, 79: 25.

[2]. Ten Brink, P., Badura, T., Farmer, A., Russi, D. (2012). The Economics of ecosystem and biodiversity for water and wetlands:abriefing note, Institute for European Environmental Policy, London. 84.

[3]. Barbier, E. B. (2013). Valuing ecosystem services for coastal wetland protection and restoration: progress and challenges, Resources, 2: 213-230. https://doi.org/10.3390/resources2030213, doi.org/10.3390/resources2030213.

[4]. Elmberg, J., Nummi, H., Poeysae, A., Sjoeberg, k. (1994). Relatronships between species number, lake size and resource diversity in assemblesay of breeding water fowl, Biogeogr, 21: 75-84, doi.org/10.2307/2845605.

[5]. Zedler, J. B., Kercher, S. (2005). Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability, Annual Review of Environment and Resources, 15: 39-74.

[6]. Wang, X. Y., Feng, J., Zhao, J. M. (2010). Effects of crude oil residuals on soil chemical properties in oil sites, Momoge Wetland. China. Environmental Monitoring and Assessment, 161: 271-280, https://doi.org/10.1007/s10661-008-0744-1.

[7]. Kim, K. G., Lee, H., Lee, D. H. (2011). Wetland restoration to enhance biodiversity in urban areas – a comparative analysis, Landscape and Ecological Engineering, 7: 27-32.

[8]. Bassi, N., Dinesh Kumai, M., Sharma, A., Pardha-Saradhi, P. (2014). Status of wetlands in India: A review of extent, ecosystem benefits, threats and management strategies, Journal of Hydrology: Regional Studies 2, 1-19.

[9]. Balogun, A. L., Yekeen, S. T., Pradhan, B., Althuwaynee, O. F. (2020). Spatio-temporal analysis of oil spill impact and recovery pattern of coastal vegetation and wetland using multispectral satellite landsat 8-OLI imagery and

machine learning models. Remote Sensing, 12: 1225, https://doi.org/10.3390/rs12071225.
[10]. Kuang, S. P., Dong, Z. W., Wang, B. C., Wang, H. H., Li, J. L. & Shao, H. B. (2021). Changes of sensitive microbial community in oil polluted soil in the coastal area in Shandong, China for ecorestoration. Ecotoxicology and Environmental Safety, 207: 111551, https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111551.
[11]. Zheng, X. X., Wang, H., Tao, Y., Kou, X. Ch., He Ch, U. & Wang, Z. Q. (2022). Community diversity of soil meso-fauna indicates the impacts of oil exploitation on wetlands. Ecological Indicators, 144: 109451. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109451.
[12]. Davis, T. J. (1993). Towards the wise use of wetlands, Gland, Switzerland: Ramsar Convention Bureau Report, 180, ISBN: 2-940073-07-4.
[13]. Royal C. Gardner & Nick C. Davidson (2007) The ramsar convention. Wetlands: Integrating multidisciplinary concepts, 3td edition, Ramsar Convention Secretariat: Gland, Switzerland), Springer, 189-203, ISBN 978-94-007-0551-7.
[14]. Maltby, E. & Acreman, M. (2011). Ecosystem services of wetlands: pathfinder for a new paradigm, Hydrological Sciences Journal, 56: 1341-1359, https://doi.org/10.1080/02626667.2011.631014.
[15]. Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., Van de Leemput, I. A., Lough, J. M., Morrison, T. H., Palumbi, S. R., van Nes, E. H. & Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the anthropocene, Nature, 546: 82–90. https://doi.org/10.1038/nature22901.
[16]. Wei, J., Gao, J., Wang, N., Liu, Y., Wang, Y. W., Bai, Z. H., Zhuang, X. L. & Zhuang, G. Q. (2019). Differences in soil microbial response to anthropogenic disturbances in Sanjiang and Momoge Wetlands, China, FEMS Microbiology Ecology, 95: 110, https://doi. org/10.1093/femsec/fiz110.
[17]. Hoegh-Guldberg, O., Poloczanska, E. S., Skirving, W. & Dove, S. (2017). Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification, Frontiers in Marine Science, 158: 20, https:// doi.org/10.3389/fmars.2017.00158.
[18]. Anthony, K. R. N., Helmstedt, K. J., Bay, L. K., Fidelman, P., Hussey, K. E., Lundgren, P., Mead, D., McLeod, I. M., Mumby, P. J., Newlands, M., Schaffelke, B., Wilson, K. A. & Hardisty, P. E. (2020). Interventions to help coral reefs under global change a complex decision challenge. PLoS One 15: 1-14. https://doi.org/10.1371/journal, pone.0236399.
[19]. Ranjbar-Jafarabadi, A., Riyahi-Bakhtiyari, A., Shadmehri-Toosi, A. & Jadot, C. (2017). Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments and coastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian Gulf, Iran, Chemosphere, 185: 1090-1111, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.110.
[20]. Mille, G., Asia, L., Guiliano, M., Malleret, L. & Doumenq, P. (2007). Hydrocarbons in Coastal Sediments from the Mediterranean Sea (Gulf of Fos Area, France), Marine Pollution Bulletin, 54: 566-575, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.12.009.
[21]. Carpenter, A. (2019). Oil pollution in the North Sea: the impact of governance measures on oil pollution over several decades, Hydrobiologia, 845: 109-127.
[22]. Mirza. R., Mohammadi, M., Faghiri, I., Abedi, E., Fakhri, A., Azimi, A. & Zahed, M. A. (2014). Source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment samples from the northern part of the Persian Gulf, Iran, Environmental Monitoring and Assessment, 186: 7387-7398.
[23]. Paluselli, A., Fauvelle, V., Schmidt, N., Galgani, F., Net, S. & Sempere, R. (2018). Distribution of phthalates in Marseille Bay (NW Mediterranean Sea), Science of the Total Environment, 621, 578-587, 10.1016/j.scitotenv.2017.11.306.
[24]. Kennish, M. J. (2002). Environmental threats and environmental future of estuaries, Environmental Conservation., 29: 78-107.
[25]. Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., d›Agrosa, C. & Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems, Science, 319: 948-952.
[26]. Richmond, R. H., Tisthammer, K. H. & Spies, N. P. (2018). The effects of anthropogenic stressors on reproduction and recruitment of corals and reef organisms, Frontiers in Marine Science, 5: 226, doi.org/10.3389/fmars.2018.00226.
[27]. Rodríguez-Barroso, M. R., García-Morales, J. L., Oviedo, C. & Quiroga Alonso, J. M. (2010) An assessment of heavy metal contamination in surface sediment using statistical analysis, Environmental Monitoring Assessment, 163: 489-501.
[28]. Yang, L., Chen, F., Zhang, L., Liu, J., Wu, S. & Kang, M. (2012). Comprehensive assessment of heavy metal contamination in sediment of the Pearl River estuary and adjacent shelf, Marine Pollution Bulletin, 64: 1947-1955, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.04.024.
[29]. Noman, M. A., Feng, W., Zhu, G., Hossain, M. B., Chen, Y., Zhang, H. & Sun, J. (2022). Bioaccumulation and potential human health risks of metals in commercially important fishes and shellfishes from Hangzhou Bay,

China. Scientific Reports, 12: 1-15.
[30]. Fatemi, S. M. R. & Shokri, M. R. (2001). Iranian coral reefs status with particular reference to Kish Island, Persian Gulf. International Coral Reef Initiative Indian Ocean Regional Workshop, Muzambique, 13.
[31]. Fouda, M. (1997). Overview on Land-Based sources and activities affecting the marine environment in ROPME Sea Area (DRAFT), Prepared for Unep and Ropme.
[32]. Monikh, F. A., Safahieh, A., Savari, A. & Doraghi, A. (2013). Heavy metal concentration in sediment, benthic, benthopelagic, and pelagicfish species from Musa Estuary (Persian Gulf), Environmental Monitoring and Assessment, 185: 215-222.
[۳۳]. سید هشترودی، م.، صالح، ا. و شیجونی فومنی، ن. (۱۳۹۶). ارزیابی اولیه از غلظت ترکیبات PAH در نمونه‌های رسوب و مرجان Acropora downingi جمع‌آوری شده از جزیره هنگام، مجموعه مقالات اولین همایش بین‌المللی اقیانوس‌شناسی غرب آسیا، تهران، ایران، ۴.
[۳۴]. میروکیلی، ح. س.، حاجی‌زاده ذاکر، ن. (۱۳۹۲). غلظت و منشاء هیدروکربن‌های نفتی کل در خلیج فارس (TPH) در رسوبات ساحلی جزیره خارک. مجله محیط شناسی، ۳۹، ۴: ۱۴۸-۱۳۷.
[۳۵]. نامی، م. ح. (۱۳۹۶). ویژگی‌های خلیج‌فارس، فصلنامه مطالعات خلیج‌فارس، ۲، ۴: ۶۱-۴۸.
[۳۶]. عسکری حصنی، م.، بلوکی کورنده، م.، ایرانمنش، م.، میرشکار، د.، هاشم‌آبادی، م.، طالبی متین، م.، فتح‌اله‌زاده، ز.، تیموری، ب.، عسکری، ا.، قاسمی، م و اکبرپور، م. (۱۳۹۹). تعیین زیستگاه‌های حساس تخم‌گذاری و وضعیت تولیدمثلی گونه در خطر انقراض لاک‌پشت منقار عقابی در تالاب بین‌المللی شیدور، مجله بوم‌شناسی آبزیان، ۱۰(۲): ۱۰۵-۹۵.
[۳۷]. مرادی، م.، وارسته، ط. و نبی‌پور، ا. (۱۳۹۵). مرجان‌های خلیج‌فارس و مهندسی بافت (چاپ اول)، ناشر دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی، بوشهر، ۲۲۰.
[38]. Moopam (2010) Manual of oceanographic observation and pollutant analyses methods, Regional Organization for the Protection of the Marine Environment, Kuwait (Ropme), 585.
[39]. Monazami-Tehrani, G. H., Hshim, R., Sulaiman, A. H., Tavakoly-Sany, S. B., Khani-Jani, R. & Monazami-Tehrani, Z. (2012). Assessment of contamination by petroleum hydrocarbons in sediments of musa bay, Northwest of the Persian Gulf-Iran, International Conference on Environment, Energy and Biotechnology (Singapore), 33: 75-80.
[40]. Long, E. R., MacDonald, D. D., Smith, S. L. & Calder, F. D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments, Environmental Management, 19: 81-97.
[41]. Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control, A sedimentological approach, Water research, 14: 975-1001.
[42]. Tolosa, I., de Mora, S., Sheikholeslami, M. R., Villeneuve, J. P., Bartocci, J. & Cattini, C. (2004). Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments, Marine Pollution Bulletin, 48: 44-60, doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00255-8.
[43]. Goldberg, E. D. (1976). The Health of the Oceans. Unesco Press, Paris, 172.
[44]. Massoud, M. S., Al-Abdali, F., Al-Ghadban, A. N. & Al-Sarawi, M. (1996). Bottom sediments of the Arabian Gulf—II. TPH and TOC contents as indicators of oil pollution and implications for the effect and fate of the Kuwait oil slick, Environmental Pollution, 93, 271-284.
[45]. Commendatore, M. G. & Esteves, J. L. (2007). An assessment of oil pollution in the coastal zone of Patagonia, Argentina, Environmental Management, 40, 814-821.
[۴۶]. ماشینچیان مرادی، ع.، ممهد هروی، م.، عبدی اسکویی، س. ح.، محمودی، ا. س. و اسکندری، م. (۱۳۹۲). بررسی هیدروکربن‌های آلیفاتیک در ترکیب نفت خام سکوهای نفتی خلیج‌فارس، مجله پژوهش نفت، ۲۳ (۷۴): ۱۵۰-۱۴۴.
[۴۷]. سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (۱۳۸۲). جغرافیای جزایر ایرانی خلیج‌فارس: استان هرمزگان: جزیره لاوان (چاپ اول)، ن تهران، ۲۸۸.
[48]. Maktoof, A. A., Alkhafaji, B. Y. & Al-janabi, Z. Z. (2014). Evaluation of total hydrocarbons levels and traces metals in water and sediment from main outfall drain in Al-Nassiriya City/Southern Iraq, Natural Resources,

5: 795-803.
[49]. Monazami-Tehrani, G. H., Tavakoly-Sany, S. B., Hashim, R., Salleh, A. (2016). Predictive environmental impact assessment of total petroleum hydrocarbons in petrochemical wastewater effluent and surface sediment, Environmental Earth Sciences, 75: 1-13.
[۵۰]. رایگانی، ب.، نجفی یاسوری، م.، بداقی جمالی، ج. و سرخیل، ح. (۱۳۹۸). شناسایی لکه‌های آلودگی‌های نفتی با استفاده از سری زمانی داده‌های سنجنده مودیس (مطالعه موردی: آب‌های خلیج‌فارس)، مجله پژوهش نفت، ۲۹، (۱۰۸): ۱۰۶-۹۷.
[51]. Mohebbi-Nozar S L, Pauzi Zakaria M, Mortazawi M S, Salimizadeh M, Momeni M, Akbarzadeh Gh A, Ismail W R (2015) Total petroleum hydrocarbons in sediments from the coastline and mangroves of the northern Persian Gulf. Marine Pollution Bulletin, 95: 407-411.
[۵۲]. محمدی گلنگش، م.، صنعتی، ع. م.، بزرگ‌پناه، ز. (۱۳۹۷). بررسی هیدروکربن‌های نفتی کل (TPH) و فلزات شاخص (Ni and V) در گاماروس Pontogammarus maeaoticus و رسوبات ساحلی دریای خزر، استان گیلان، مجله بوم‌شناسی آبزیان، ۷، (۴): ۱۷-۹.
[53]. Silva, C. S., Moreira. I. T., de Oliveira, O. M., Queiroz, A. F., Garcia, K, S., Falcão, B. A., Escobar, N. F. & Rios, M. C. (2014). Spatial distribution and concentration assessment of total petroleum hydrocarbons in the intertidal zone surface sediment of Todos os Santos Bay, Brazil, Environmental monitoring and assessment, 186: 1271-1280.
[54]. Ololade, I. A., Lajide, L. & Amoo, I. A. (2009). Spatial trends of petroleum hydrocarbons in water and sediments, Central European Journal of Chemistry, 7: 83-89.
[55]. Al-Imarah, F. J. M., Ali, S. A. & Ali, A. A. (2010). Temporal and spatial variations of petroleum hydrocarbons in water and sediments from Northern parts of Shatt Al-Arab River, Iraq, Journal of Marine Mesopotamia Sciences, 25: 65-74.
[56]. Li, Y., Zhao, Y., Peng, S., Zhou, Q. & Ma, L. Q. (2010) Temporal and spatial trends of total petroleum hydrocarbons in the seawater of Bohai Bay, Marine Pollution Bulletin, 60: 238-243, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.09.020.
[57]. Metwally, M. E. S., Al-Muzaini, S., Jacob, P. G. & Bahloul, M. (1997). Petroleum hydrocarbons and related heavy metals in the near-shore marine sediments of Kuwait. Environment International, 23: 115-121, doi.org/10.1016/S0160-4120(96)00082-7.

تجزیه طیفی نمودارهای پتروفیزیکی جهت تعیین مرزهای چینه‌نگاری سکانسی سازند دالان و کنگان دریکی ازمیادین گازی جنوب ایران با استفاده ازآنالیز موجک و نگاره اینپفا (INPEFA)

سیده اعظم طیبان[۱]، علی کدخدایی[۲*]، مهران آرین[۱]،حسین رحیم پوربناب[۳] و سید محسن آل علی[۱]

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فن‌آوری‌های همگرا، دانشگاه آزاداسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تبریز، ایران

۳- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم پایه، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳

چکیده

میدان گازی پارس جنوبی، یکی از میادین جنوب غربی ایران در حوضه رسوبی زاگرس بوده و شامل دو مخزن کنگان و دالان است. سازندهای کنگان و دالان به گروه دهرم تعلق دارند و از مهم‌ترین مخازن گازی در ناحیه خلیج فارس محسوب می‌شوند. استفاده از لاگ‌های چاه‌پیمایی، در چاه‌های بدون مغزه، به‌منظور شناسایی عوارض وابسته به طبقات سنگی، همواره مورد بحث زمین‌شناسان بوده است. در این مطالعه، براساس آنالیز موجک لاگ‌های گاما، نوترون و صوتی، سطوح سکانسی شامل مرز سکانسی و سطح حداکثر غرقابی، شناسایی شد. در این مطالعه سعی شده است با استفاده از آنالیز موجک داده‌های چاه‌پیمایی مانند GR, NPHI,RHOB,DT و نیز ترکیب نمودن آنها با داده‌های سیکلولاگ، روشی مناسب و کم خطا برای تعیین خودکار این مرزها ارائه شود. همچنین در این مطالعه، بررسی چینه‌نگاری سکانسی با روش INPEFA نرم‌افزار سیکلولاگ انجام گردید و مرزهای سکانسی (SB) و سطح حداکثر غرقابی (MFS) به‌ترتیب با نقاط عطف مثبت و نقاط عطف منفی منحنی INPEFA لاگ‌های در دسترس، تعیین شد. به‌علاوه، دسته رخساره‌های تراز بالا (HST) از روی روند منفی منحنی INPEFA و دسته رخساره‌های پیش‌رونده (TST) هم از طریق روند مثبت این منحنی مشخص شدند. بر همین اساس، بررسی چینه‌نگاری سکانسی سازندهای دالان و کنگان با روش INPEFA در ۴ چاه میدان گازی پارس جنوبی انجام شد. در نهایت تطابق بین مرزهای سکانسی خودکار به‌دست آمده از روش تبدیل موجک و INPEFA و مقایسه آن با اطلاعات مغزه در چهار چاه از میدان مورد مطالعه، نتایج رضایت‌بخشی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سازند دالان، سازندکنگان، چینه‌نگاری سکانسی، آنالیزموجک، سیکلولاگ

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4753.3133)

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۸۷-۷۳

مقدمه

سازنددالان (پرمین فوقانی) و سازندکنگان (تریاس زیرین)، معادل سازند خوف، با توالی کربناته-تبخیری به‌عنوان اصلی‌ترین مخازن گازدار به‌حساب می‌آیند. سازند دالان و کنگان در میدان پارس جنوبی به‌دلیل قابلیت‌های مخزنی و داشتن توان هیدروکربنی از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان بوده است و از جنبه‌های مختلفی مانند محیط رسوبی، فرآیندهای دیاژنزی، چینه‌نگاری سکانسی و تغییرات کیفیت مخزنی مورد پژوهش قرارگرفته است [۵-۱]. مطالعه مستقیم برروی داده‌های حفاری مانند آنالیز مغزه، هزینه بسیار بالایی دارد. از این رو متخصصان برای شناسایی خصوصیات مخازن نفتی، تلاش می‌نمایند به‌روش‌های کم هزینه تر و سریع‌تر روی آورند. استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی و تجزیه و تحلیل آن با تکنیک‌های جدید پردازش کامپیوتری، مبتنی بر الگوریتم‌های ریاضی یکی از آن روش‌ها است. یکی از روش‌های جدید پردازش داده‌ها، آنالیز موجک می‌باشد. آنالیز موجک روشی است که حساسیت بالایی نسبت به تغییرات ناگهانی دارد [۹-۶]. بر این اساس می‌تواند در تشخیص و تعیین مرزهای سکانسی که معمولاً از نوع ناپیوستگی می‌باشند؛ مورد استفاده قرارگیرد. چینه‌نگاری سکانسی زیرشاخه‌ای از علم چینه‌نگاری است که براساس الگوهای انباشت چینه‌ای و روابط چینه‌ای میان آنها به‌شرح، تفسیر، طبقه‌بندی و نام‌گذاری سنگ‌های رسوبی می‌پردازد [۱۲-۱۰]. چینه‌نگاری سکانسی به‌طور منحصر به فردی در تجزیه و تحلیل تغییرات رخساره‌ها و خصوصیات شکل هندسی چینه‌ها و شناسایی سطوح کلیدی، جهت تعیین ترتیب زمان‌شناسی پرشدن حوضه و رخدادهای فرسایشی متمرکز می‌باشد [۱۳]. علم چینه‌نگاری سکانسی، مرزهای واحدهای اصلی خود را به نام سکانس رسوبی در قالب مرزهای زمانی قرار داده است و واحدهای مرتبط از نظر زایشی را از یکدیگر متمایز می‌نماید. بر این اساس تطابق واحدهای مخزنی در قالب واحدهای رسوبی امکان‌پذیر می‌گردد. در این مطالعه سعی داریم با استفاده از آنالیز موجک به تجزیه تحلیل داده‌های چاه‌پیمایی پرداخته و به‌وسیله آن مرز سکانس‌های رسوبی که معمولاً از نوع ناپیوستگی‌ها بوده و منطبق بر مرز مخازن هیدروکربنی می‌باشند را شناسایی نماییم. با استفاده از نرم‌افزار متلب و سیکلولاگ و تلفیق داده‌های حاصل از خروجی هر دو نرم‌افزار، تطابق بین سکانس‌های رسوبی در چاه‌های مورد مطالعه انجام شد.

زمین‌شناسان نفتی از نمودارهای الکتریکی به‌ویژه نمودار گاما جهت تفکیک مناطق مخزنی و انطباق بین چاه‌های مختلف یک میدان و نیز در آنالیز چینه‌نگاری سکانسی جهت شناسایی سطوح سکانسی استفاده می‌کنند. نمودار الکتریکی گاما را می‌توان به‌صورت یک موج مرکب فرض کرد که از تعداد زیادی موجک تشکیل شده است. این موجک‌ها در حقیقت همان آثار چرخه‌های میلانکویچ هستند که به‌همراه دسته‌ای از امواج مزاحم، نمودارهای الکتریکی را می‌سازند. برای مطالعه سیکلواستراتیگرافی باید بتوان این موج مرکب را به اجزای تشکیل‌دهنده آن تجزیه نمود که برای این منظور از نرم‌افزار سیکلولاگ استفاده می‌شود [۱۴]. نرم‌افزار سیکلولاگ[1] یک نرم‌افزار مهندسی تخصصی می‌باشد که ویژه زمین شناسی نفت طراحی شده و جهت انجام کارهایی از قبیل خوشه‌بندی، زون‌بندی مخزنی، انطباق لاگ‌ها، آنالیز فراوانی، محاسبات پتروفیزیکی، محاسبه و ایجاد لاگ (دانسیته از صوتی، صوتی از دانسیته، نمودار (INPEFA) و ساخت سایزموگراف کاربرد دارد [۱۵]. اگرچه نمودار گاما سطوح سکانسی مهم را نشان می‌دهد ولی سطوح سکانس‌های کوچک‌تر و پارا سکانس‌ها را خوب نشان نمی‌دهد و تغییرات جزیی را به‌خوبی مشخص نمی‌کند.

1. Joule – thomson (JT)

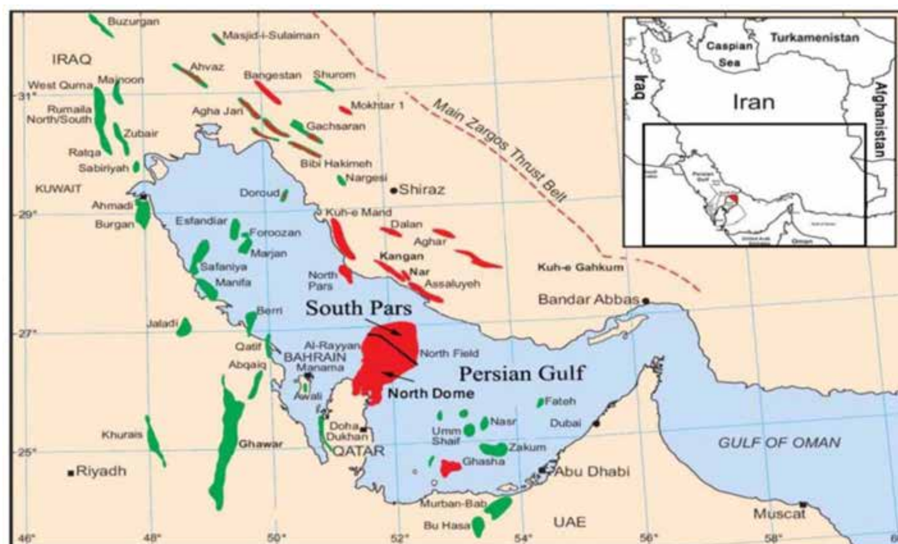
نرم‌افزار سیکلولاگ بـا اسـتفاده از نمـودار گاما و آنـالیز آن، نمـوداری بـه نـام INPEFA [1] تهیه مـی‌کنـد کـه در آن سـطوح سکانسـی کـاملا مجزا شده و شناسـایی آن آسـان مـی‌شـود. همچنیـن، انطبـاق سـطح‌هایی شناسـایی شـده به‌راحتـی انجـام می‌گیـرد. منحنـی INPEFA (منحنـی فیلتـر تحلیـل پیـش بینـی خطـای یکپارچـه) یـک روش منحصـر بـه فـرد در شناسـایی سـطوح سکانسـی و همچنیـن تقسـیمات چینه‌نـگاری سکانسـی می‌باشـد، کـه در مطالعـات به‌صـورت گسـترده مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیـرد [۱۶ و ۱۷].

زمین‌شناسی وچینه‌شناسی

زمین‌شناسـی و چینه‌شناسـی حوضـه رسـوب‌گذاری منطقـه مـورد مطالعـه دربرگیرنـده رسـوبات و وقایعـی از زمـان پرکامبریـن تـا زمـان حـال اسـت. تصـور بـر ایـن اسـت کـه شـیل‌های سـیلورین، سـنگ منشـأ ذخایـر نفتـی و گازی عظیـم پالئوزوئیـک در ایـن حوضـه رسـوبی می‌باشـند [۱۸]. بخش‌هـای شـمالی صفحـه عربـی از دیربـاز به‌دلیـل دارابـودن ذخایـر عظیـم هیدروکربـوری مـورد توجـه بـوده اسـت [۱۹]. میدان پارس جنوبی واقـع در جنـوب ایـران در منطقـۀ خلیـج فارس بخشـی از بزرگتریـن میـدان گازی جهـان در مـرز مشـترک ایـران و قطـر و در ادامـۀ میـدان شـمالی قطـر می‌باشـد. میـدان گازی پـارس جنوبـی بـا وسـعت ۹۷۰۰ km^2 در مـرز مشـترک ایـران و قطـر در خلیـج فـارس قـرار گرفتـه اسـت کـه ۳۷۰۰ km^2 از آن در داخـل مرزهـای ایـران قـرار دارد. سـازندهای کنـگان و دالان از گـروه دهـرم بـه سـن پرموتریـاس به‌عنـوان سـنگ مخـزن اصلـی ایـن میـدان شـناخته می‌شـوند. بخش ایرانی این میدان وسعتی معادل ۳۷۰۰ km^2 و ذخیره‌ای برابر ۱۴ تریلیون متر مکعب گاز به‌همراه ۱۸ میلیارد بشکه میعانات گازی دارد که حدود ۷/۵٪ از کل گاز دنیا و نزدیک به نیمی از ذخایر گاز ایران را شامل می‌شود [۱۸]. بخـش بالایـی سـازند دالان و سـازند کنـگان بـا سـن پرمیـن پسـین- تریـاس پیشـین در میدان پـارس جنوبـی قـرار دارنـد و به‌عنـوان سـنگ مخـزن ایـن میـدان به‌شـمار می‌آینـد. نبـود جدایـش هیدرولیکـی میـان ایـن دو سـازند موجـب یکپارچـه شـدن ایـن مخـزن شـده اسـت. ویژگی‌هـای ایـن دو سـازند در ایـران و معـادل آنها درصفحـه عربـی (سـازند خـوف) مختصـر تفاوت‌هایـی دارنـد کـه ناشـی از نوسـانات شـرایط محیطـی در حوضـه رسـوبی (رمـپ کربناتـی اپیریـک) اسـت [۲۳-۲۰]. میدان گازی پارس جنوبی بخشی از زاگرس است که در حوضه خلیج فارس و در حاشیه شرقی و در محل تقاطع سپرعربی و بلوک قاره‌ای ایران قرار دارد. سازند کنگان درحد فاصل این دو بلوک قاره‌ای نهشته شده است [۲۴]. سازند کنگان بخشی از گروه دهرم است که به عنوان بزرگتـرین میـزبان ذخـایر گازی دنیا، دارای اهمیـت فوق‌العاده‌ای است و بیش از m ۱۹۰ ستبرا دارد و شامل رخساره‌های آهکی، دولومیتی، دولومیـت انیدریتـی و لایه‌های نازک شیلی است [۱۸ و ۲۵]. با توجه به مطالعات انجام شده و جایگاه چینه‌شناسی سن سازندکنگان، تریاس پیشین می‌باشد و از بالا به سازند دشـتک و از پایین به سازند دالان محدود شده است [۲۵ و ۲۳]. سـازند آهکـی دالان بـا رخسـاره‌های کربناتـی تبخیـری ردیف‌هـای پرمیـن بالایـی زاگـرس مشـخص مـی شـود وتغییـرات سنگ‌شناسـی آن تابـع تغییـرات رخسـاره‌ای در موقعیت‌هـای مختلـف می‌باشـد. سـازند آهکـی کنـگان نیزکـه بیانگـر رسـوبات حاصل از پیشـروی دریـای تریـاس اسـت، در شـرایطی مشابه با سـازند دالان نهشـته شـده اسـت. میـدان پـارس جنوبـی در موقعیـت ۵۲ تـا ۵۲/۵° شـرقی و ۲۶ تـا ۲۷° شـمالی در حـدود ۱۰۰ km بنـدر عسـلویه، ۱۷۵ km کیـش و ۱۰۵ km سـواحل قطـر واقـع شـده اسـت (شـکل ۱). وسـعت ایـن میـدان بیـش از ۶۰۰۰ km^2 و دارای طـول تقریبـی ۱۵۰ و عـرض تقریبـی ۷۰ km اسـت [۲۶]. سـاختمان زمین‌شناسـی میـدان پـارس جنوبـی کـه بخـش شـمالی گنبـد پـارس جنوبـی گنبـد شـمالی را تشـکیل می‌دهـد، دارای یال‌هـای ملایـم بـوده کـه خـود تشـکیل‌دهنده یکـی از چنـد قلـه سـاختمانی برآمدگـی قطـر- فـارس برروی پلاتفـرم کربناتـه منطقـه اسـت [۲۷ و۲۴ و ۱۹].

1. Integrated Prediction Error Filter Analysis

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۸۷-۷۳



شکل ۱ موقعیت میدان گازی پارس جنوبی در آب‌های خلیج‌فارس [۲۹].

حوضه خلیج‌فارس و نواحی مجاور آن از زمان پروتروزوئیک تحت تأثیر گسل‌های پی سنگ با سه روند اصلی NW-SE , N-S, NE-SW قرار داشته است [۲۸]. ستون چینه‌شناسی میدان پارس‌جنوبی با توجه به عمق و ضخامت هر لایه در شکل زیر آمده است (شکل ۲).

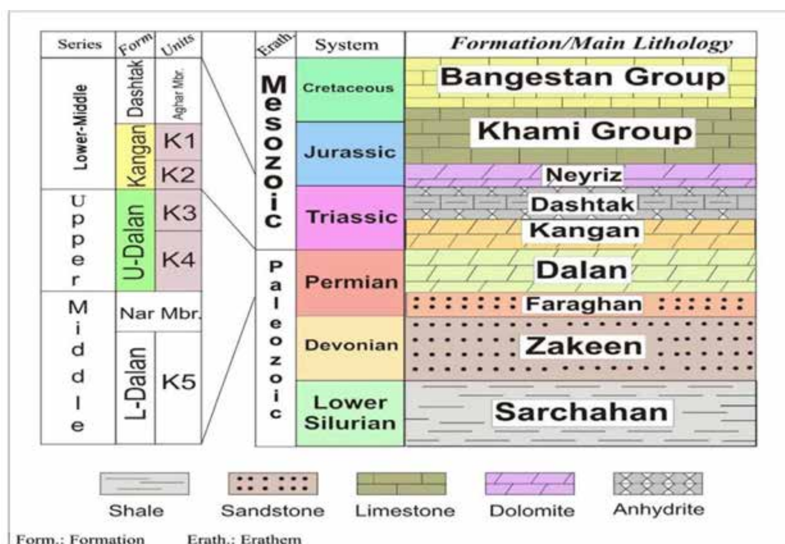
روش انجام تحقیق

در این تحقیق از اکثر مطالعات پیشین استفاده گردیده است. با بیان مفاهیم پایه مانند آنالیز موجک و چینه‌نگاری سکانسی به بررسی منطقه مورد مطالعه از لحاظ زمین‌شناسی پرداخته و با بررسی یک چاه اکتشافی که اطلاعات آنها کاملتر و دقیق‌تر از چاه‌های دیگر می‌باشد و به‌کارگیری آنالیز موجک برای تمامی داده‌های در دسترس سعی بر آن داریم تا بهترین داده‌ها و دقیق‌ترین و سریع‌ترین روش را برای تعیین این مرزها به‌کار بریم. با بررسی داده‌های چاه‌پیمایی یکی از چاه‌ها که از لحاظ داده‌های برداشت شده، حاوی دقیق‌ترین و بیشترین داده‌های چاه‌پیمایی است؛ بهترین روش و مناسب‌ترین داده‌ها را برای تعیین مرزهای سکانسی تعیین می‌کنیم و برای راستی آزمایی آن را برروی چهار چاه دیگر می‌آزماییم و در صورت تطابق یافته‌های چاه اول برروی چاه‌های بعدی نتایج را به‌کار می‌بریم. تبدیل موجک یک ابزار پردازش سیگنال است.که سیگنالی را به شکل دیگری تبدیل می‌کند. چنین تبدیل می تواند اطلاعات پنهان را در سیگنال نشان دهد که می تواند به‌نوبه خود در تفسیرهای زمین‌شناسی استفاده شود. سیگنال در این مطالعه موردی مجموعه‌ای از داده‌های لاگ چاه شامل لاگ‌های مربوط به گاما و تخلخل شامل لاگ‌های مربوط به نوترون و صوتی است که در چاه‌های حفاری اندازه‌گیری می‌شوند [۳۰].

آنالیز موجک

از نرم‌افزار متلب جهت تجزیه طیفی نمودارهای پتروفیزیکی در چاه‌های مورد مطالعه استفاده شده است. برای این کار در نرم‌افزار متلب از روش تبدیل موجک یک بعدی[1] استفاده شد.تبدیل موجک یک بعدی به دو صورت تبدیل موجک زمان گسسته در یک بعد[2] (DWT) و تبدیل موجک زمان پیوسته در یک بعد[3] (CWT) می‌باشد. که لاگ‌های مورد نظر در هر چاه توسط هر دو روش تبدیل موجک (گسسته وپیوسته) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند [۳۱].

1. Wavelate 1-D
2. Discrete Wavelate 1-D
3. Continuoue Wavelate 1-D



شکل ۲ چینه‌شناسی واحدهای مطالعه شده و واحدهای همجوار [۲۹].

تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک ضرب کردن مقدار رقمی سیگنال در مقدار رقمی موجک در مقیاس‌ها و تغییر مکان‌های آن درتمام بازه زمانی سیگنال می‌باشد. این فرآیند ضریب همبستگی موجک را که رابطه مقیاس و مکان می‌باشد به‌وجود می‌آورد. تبدیل موجک پیوسته در حقیقت به‌دست آوردن مقدار ضریب همبستگی و به بیان ساده‌تر به‌دست آوردن میزان شباهت سیگنال با موجک در مقیاس‌ها و تغییر مکان‌های متعدد است. در حقیقت این عملیات نشان‌دهنده این امر است که در کدام قسمت موج چه میزان شباهت با کدام یک از مقیاس‌های موجک وجود دارد. ضریب همبستگی ضریبی است که بیانگر میزان شباهت سیگنال به موجک می‌باشد و اغلب با ”C“ نشان داده می شود. هر چه شباهت سیگنال به موج بیشتر باشد این ضریب بزرگتر می‌باشد. برای به‌دست آوردن این ضریب مقدار رقمی شده سیگنال را در مقدار رقمی شده موجک ضرب و تمام مقادیر با یکدیگر جمع می‌شوند. به بیان ریاضی اگر سیگنال با f (t) و موجک با ψ (t) نشان داده شود مقدار C از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۳۲]:

$$C(a,\beta,f(t),\psi(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t).\frac{1}{\sqrt{a}}\psi^*(\frac{t-\beta}{a})dt \qquad (۱)$$

که در آن α پارامترمقیاس (α > 0)، β پارامتر موقعیت، f (t) سیگنال و ψ (t) موجک تحلیلی است. حاصل تبدیل موجک یک نمودار در سه بعد زمان "t"، مقیاس "S" و ضریب همبستگی "C" می‌باشد که اسکالوگرام نام دارد. همانند آنالیز فوریه در تبدیل موجک با بسط توابع سروکار داریم ولی این بسط برحسب توابع سینوسی و کسینوسی صورت نمی‌پذیرد بلکه براساس مقیاس‌های موجک انجام می‌شود.

تبدیل موجک گسسته

تبدیل موجک گسسته (DWT) تبدیل موجک را با استفاده از مجموعه‌ای گسسته از مقیاس‌ها و ترجمه‌های موجک به‌دنبال برخی قوانین تعریف شده پیاده‌سازی می‌کند. چنین تبدیلی سیگنال را به مجموعه ای از موجک‌های متعامد متقابل تجزیه می‌کند که تفاوت اصلی آن با CWT است. مزیت اصلی تجزیه، توانایی آن در تجزیه سیگنال‌های پیچیده به سیگنال‌های پایه با پهنای باند محدود و سپس بازسازی مجدد آنها با از دست دادن اطلاعات بسیار کمی است. همچنین، ازتجزیه می‌توان برای حذف نویز سیگنال استفاده کرد. با استفاده از موجک می‌توانیم نویزهایی راکه خارج از باند فرکانسی سیگنال هستند، سرکوب کنیم [۳۰].

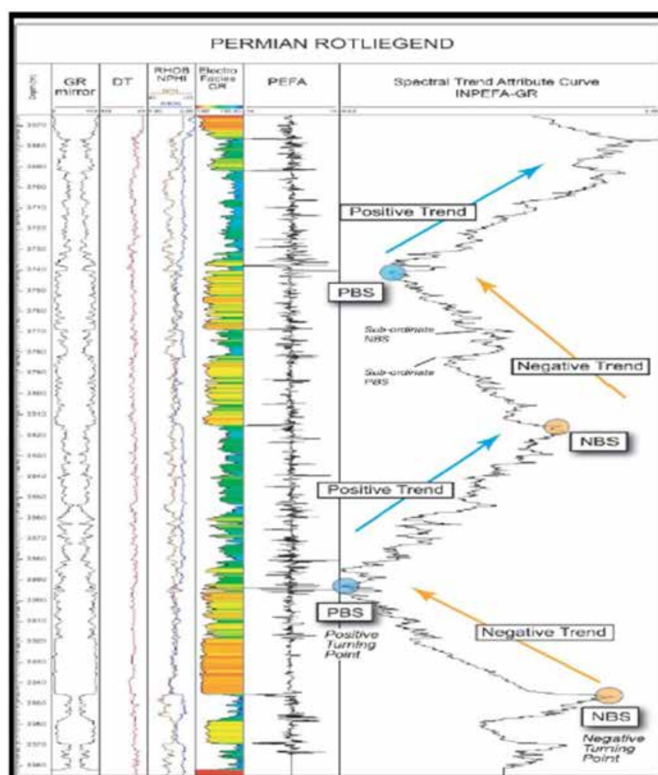
پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۸۷-۷۳

$$\psi(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \psi(S_t - K) \quad (۲)$$

که در آن S یک ضریب مقیاس است (معمولاً ۲ در نظر گرفته می‌شود). در حالت کلی، فقط تعداد کمی از ضرایب α-k غیر صفر هستند که محاسبات را ساده می‌کند.

تعیین سکانس هابا استفاده از نرم‌افزار سیکلولاگ

داده‌های ورودی نرم‌افزار سیکلولاگ داده‌های خام نمودارهای الکتریکی (مقاومت)، هسته‌ای طبیعی (گاما)، هسته‌ای القایی (نوترون و دانسیته) و نمودار صوتی می‌باشد. اما از آنجا که دیاژنز برروی نمودار گاما کمتر اثر می‌گذارد، از این نمودار بیشتر استفاده می‌شود. نرم‌افزار سیکلولاگ با استفاده از نمودار گاما نموداری به‌نام INPEFA می‌سازد. تفسیر این نمودار سبب ارزیابی چینه‌شناسی توالی رسوبی می‌شود و با استفاده از آن می‌توان یک توالی رسوبی را از قاعده به سطح در قالب بسته‌های رسوبی تقسیر نمود. تغییرات در روند نمودار INPEFA به دو صورت مثبت[1] (PB) و منفی[2] (NB) دیده می‌شود. به‌طور کلی، تغییرات روند مثبت در مرزهای سکانسی و تغییرات منفی در سطح حداکثر سیلابی[3] (MFS) را نشان می‌دهد [۳۵-۳۳]. داده‌های لاگ‌های دردسترس با فرمت LAS وارد نرم‌افزار سیکلولاگ شد و برای هر لاگ یک منحنی INPEFA منحصر به فرد خروجی گرفته شد و سطح حداکثر سیلابی MFS و مرزهای سکانسی SB به‌ترتیب با نقاط عطف منفی (NBS) و نقاط عطف مثبت (PBS) منحنی INPEFA لاگ‌های دردسترس، تعیین شد (شکل ۳). به‌علاوه دسته رخساره‌های تراز بالا (HST) از روی روند منفی منحنی INPEFA و دسته رخساره‌های پیشرونده (TST) هم از طریق روند مثبت این منحنی مشخص شدند. بر همین اساس، بررسی چینه‌نگاری سکانسی سازندهای دالان و کنگان با روش INPEFA در ۴ چاه میدان گازی پارس جنوبی انجام شد.



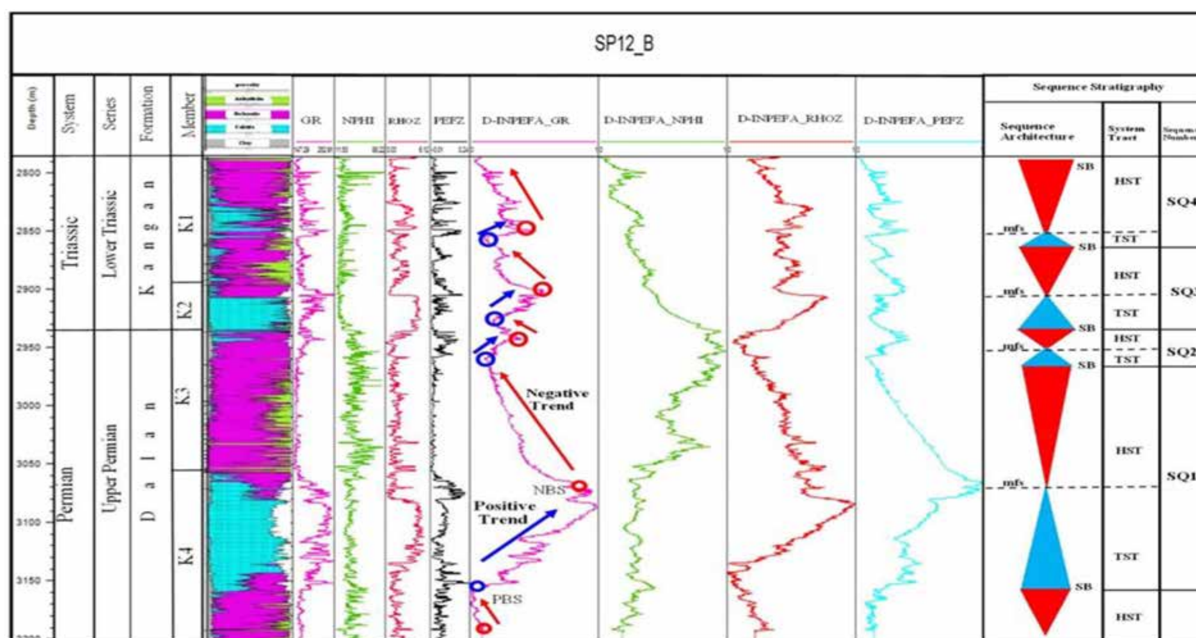
شکل ۳ منحنی INPEFA رسم شده برای لاگ گاما، و روندهای مثبت و منفی و نقاط عطف مثبت PBS و منفی NBS موجود در آن [۱۴]

1. Break Positive
2. Break Negative
3. Maximum Flooding Surface

بـا اسـتفاده از نرم‌افـزار متلـب و سـیکلولاگ وتلفیـق داده‌هـای حاصـل از خروجـی هـر دو نرم‌افـزار، تطابـق بیـن سـکانس‌های رسـوبی در چاه‌هـای مـورد مطالعـه انجـام شـد (شـکل ۴).

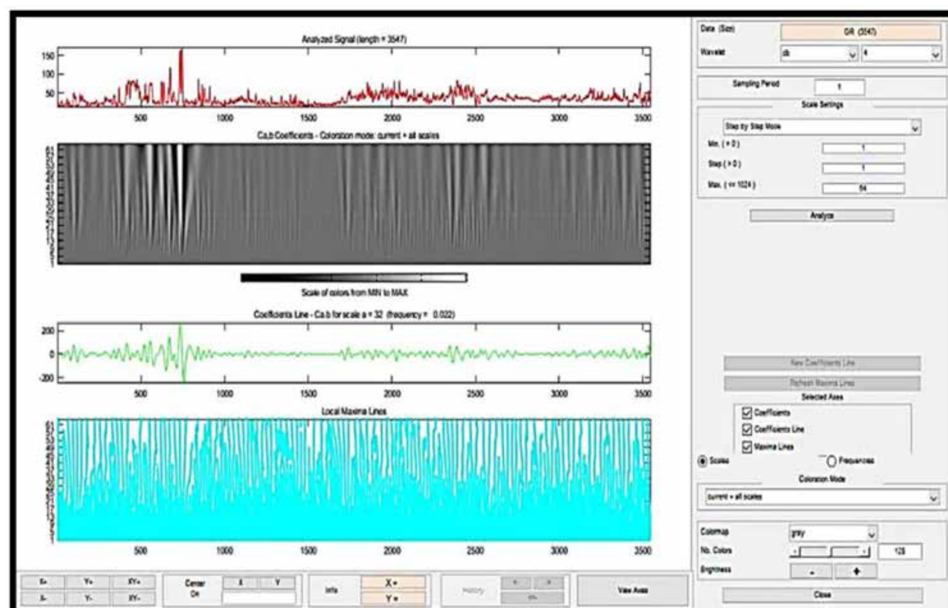
بحث

همان‌طـور کـه مشـاهده می‌کنیـد سـکانس‌ها دارای میـزان بـالای گامـا بـوده و ایـن میـزان بـالای گامـا خـود یکـی از عوامـل وجـود سـکانس چینـه‌ای در چـاه مـورد نظـر می‌باشـد و از طـرف دیگـر، افزایـش و کاهـش ناگهانـی می‌توانـد خـود یکـی از نشـانه‌های سـکانس‌های چینـه‌ای باشـد. حـال آنکـه افزایـش میـزان لاگ نوتـرون و سـونیک از یـک سـو و از سـوی دیگـر کاهـش میـزان لاگ چگالـی خـود مؤیـد وجـود یـک سـکانس چینـه‌ای می‌باشـد. در لایه‌هـای شـیلی میـزان تخلخـل بالاتـر بـوده پـس می‌تـوان دریافـت کـه میـزان لاگ نوتـرون کـه تخلخـل اسـت به‌صـورت افزایشـی بـوده و همـان انـدازه، میـزان لاگ سـونیک بـالا خواهـد بـود و به‌طبـع افزایـش میـزان لاگ گامـا، لاگ چگالـی بـا کاهـش روبـرو خواهـد بـود. حـال آنکـه در لایه‌هـای رسـی آبـدار هماننـد قبـل میـزان لاگ تخلخـل نوتـرون و سـونیک افزایشـی بـوده و لاگ چگالـی نیـز کاهـش داشـته ولـی میـزان لاگ گامـا با افزایـش روبـرو بـوده ولـی مقـدار آن نسـبت بـه لایه‌هـای شـیلی کمتـر می‌باشـد. می‌تـوان بیـان نمـود کـه در نمودارهـای سـکانس چینـه‌ای میـزان اورانیـوم بـالا بـوده و ایـن خـود مؤیـد وجـود شـیل و رس می‌باشـد. همان‌گونـه کـه در قبـل نیـز گفتـه شـد میـزان لاگ گامـا بـالا بـوده کـه بـه همیـن ترتیـب میـزان لاگ تخلخـل نوتـرون و میـزان لاگ سـونیک نیـز بـالا مـی‌رود و در سـمت دیگـر میـزان لاگ چگالـی پاییـن اسـت. مـا در پیک‌هـای لاگ گامـا می‌توانیـم مـرز سـکانس‌ها را تشـخیص دهیـم. از بالاتریـن پیـک پیـش رو تـا بالاترین پیـک در قسـمت بعد ادامـه داد کـه ایـن خـود تشـکیل دهنـده یـک سـکانس اصلـی می‌باشـد. همان‌طـور کـه کـه قابـل مشـاهده اسـت بـرای تمامـی چاه‌هـا یـک ضریـب همبسـتگی CWT بـا توجـه بـه فرمول‌هایـی کـه بیـان شـده طراحـی گشـته اسـت کـه بیـن ۱ تـا ۶۴ می‌باشـد کـه در ایـن محـدوده عـددی همان‌گونـه کـه بـا رنگ‌بنـدی طوسـی مشـخص گردیـده اسـت بـه خوبـی بـرای هـر یـک از لاگ‌هـای گاما و سـونیک و نوتـرون مشـخص گردیـده اسـت و بـا یـک طیـف رنگـی مناسـب به‌خوبـی و بـا وضـوح خـوب قابـل مشـاهده می‌باشـد.

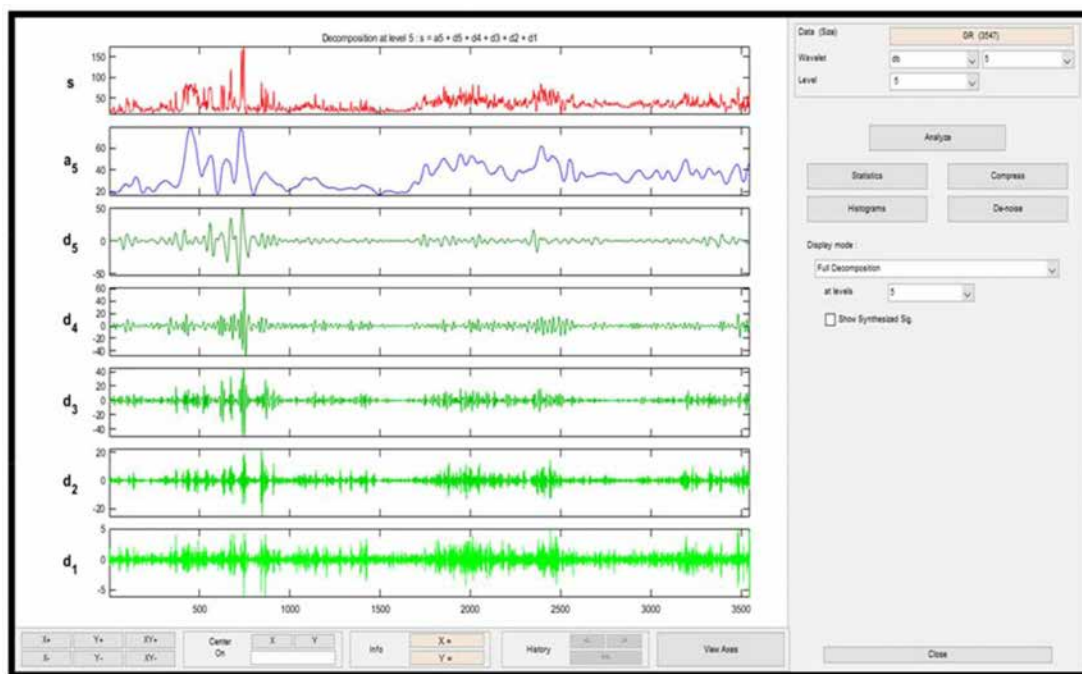


شکل ۴ تقسیم‌بندی چینه‌نگاری سکانسی با کاربرد روش INPEFA و مدل شماتیک آن

روش تبدیل موجک پیوسته CWT برای تجزیه لاگ‌های گاما و تخلخل به مجموعه‌ای از ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف استفاده شد. روش‌های مختلف تجسم گرافیکی از نتایج تبدیل موجک پیوسته اجازه درک بهتر از مرزهای سکانسی اصلی را می‌دهد. ضرایب CWT در ۶۴ مقیاس با استفاده از موجک db- 5 دابیشیز به‌دست آمده و یک حالت رنگ آمیزی مقیاس خاکستری برای نمایش انتخاب شد (شکل ۵). بعد از رسم لاگ سیگنال و CWT و لاگ گاما همان‌طور که در عکس مشخص است در جاهایی که پیک سیگنال وجود دارد در آنجا نیز CWT به‌سمت رنگ طوسی تیره می‌رود و در جاهایی که پیک سیگنال کم می‌شود CWT نیز به‌سمت رنگ طوسی روشن تمایل پیدا می‌کند. در حال حاضر می‌توان بیان نمود یک ارتباط خوب و واضح بین نمودار CWT و سیگنال وجود دارد که با افزایش پیک سیگنال میزان رنگ طوسی تیره و یا بلعکس روشن می‌شود. همان‌گونه که قابل مشاهده است نمودار CWT با موجک db-5 از تجزیه لاگ‌های چاه‌پیمایی به پنج دسته تقسیم شده و به‌وجود آمده است. در این شکل نمودار قرمز رنگ سیگنال s را نشان می‌دهد، نمودار آبی رنگ نمودار تقریب پنجم a_5 را نشان داده و ۵ نمودار دیگر سبز رنگ تمامی نمودارهای جزئیات را نشان (d_1,d_2,d_3,d_4,d_5) دهند. از جمع تمامی نمودارهای جزئیات و جمع آنها با نمودار تقریب پنجم a_5 نمودار گاما بازسازی خواهد شد. همان‌گونه که قابل مشاهده است تمامی یا لااقل بیشتر پیک‌های ضعیف و نوسانات ضعیف لاگ گاما کاملاً تقویت شده است و به‌وسیله نمودار DWT قابل تجزیه و تفسیر است. این تقویت دامنه پیک‌های ضعیف یا همان نوسانات ضعیف لاگ گاما در تمامی چاه‌ها قابل مشاهده و رؤیت می‌باشد. DWT با موجک db-5 لاگ چاه را به پنج تقریب و پنج جزئیات تجزیه می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود لاگ گاما از جمع d1,d2,d3,d4,d5 بازسازی می‌شود (شکل ۶). با استفاده از تبدیل موجک گسسته DWT حداکثر سطح سیلابی از هر دو محتوای فرکانس بالا و فرکانس پایین سیگنال ها با موفقیت شناسایی شد. در تمام A و D یک پیک نوک تیز وجود داردکه مربوط به حداکثر سطح سیلابی MFS یک اوج شدید وجود دارد که به‌طور خاص در ضرایب تقریب پنجم a5، جزئیات پنجم d5، جزئیات چهارم d4 و جزئیات سوم d3 قابل مشاهده است.

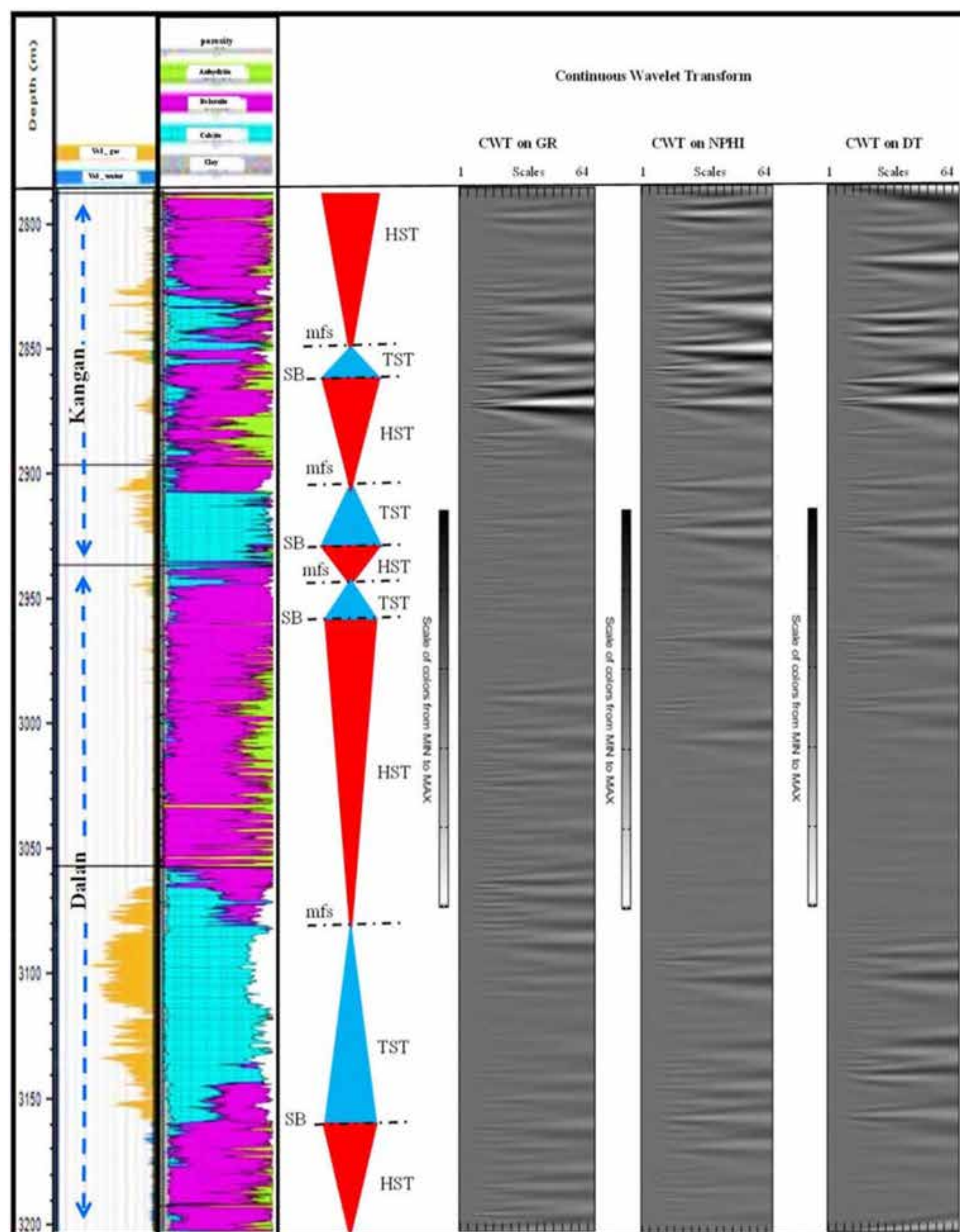


شکل ۵ تصویری از ضرایب CWT، در چاه B

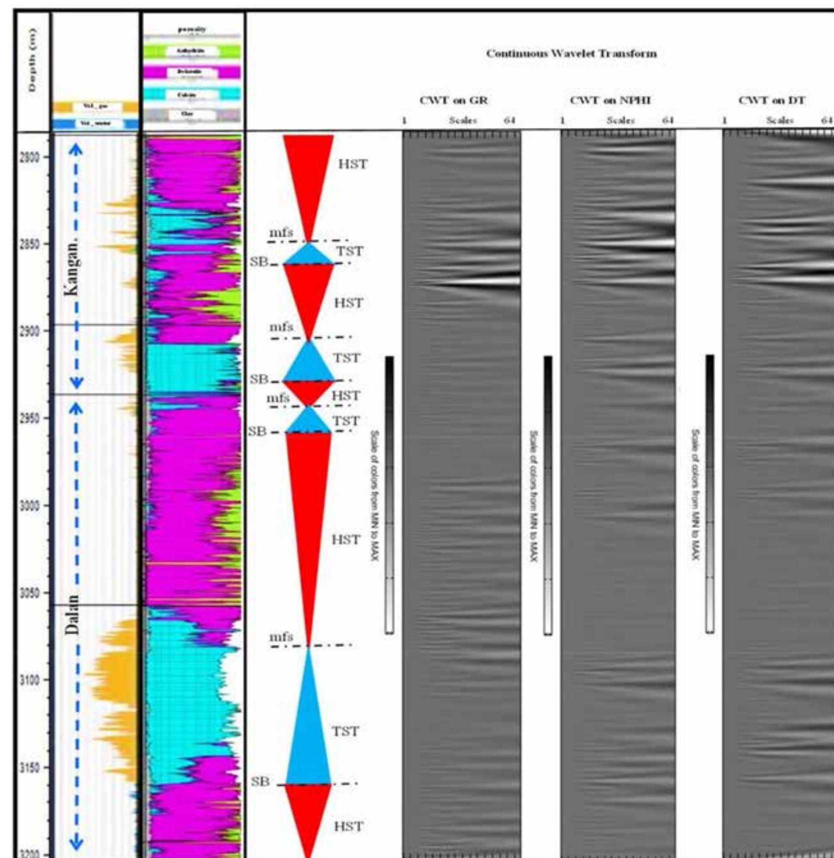


شکل ۶ اعمال DWT با موجک db-5

مرزهـای سکانسـی از محتویـات فرکانـس پاییـن سـیگنال‌ها به‌ویـژه تقریب پنجـم a5 بـه بهتریـن وجـه تشـخیص داده می‌شـوند. به‌طـور معمـول، تقریـب پنجـم مربـوط بـه مرزهـای سکانسـی اسـت کـه در تخلخل‌هـای بالاتـر سـنگ‌های کربناتـه سـازند دالان وکنـگان ایجـاد می‌شـود. توافـق خوبـی بیـن حداکثـر سـطح سـیلابی و ضرایـب موجـک وجـود دارد. نمایـش رنـگ ضرایـب تبدیـل موجـک پیوسـته از مقیـاس ۶۴ تـا ۱. یـک ویژگـی مخروطـی شـکل در اسـکالوگرام مربـوط بـه MFS ایجـاد می‌شـود. مرزهـای سکانسـی مربـوط بـه اوج زون متخلـل اسـت کـه بـا رنـگ روشـن اسـکالوگرام مشـخص می‌شـود (شـکل‌های ۸ و ۷). همان‌طـور کـه می‌بینیـم تمامـی چاه‌هـا از چهـار سـکانس تشـکیل شـدند کـه در ابتـدا و انتهـای هـر سـکانس SB و در میانـه آن MFS کـه خودسـکانس اصلـی اسـت قـرار دارد. همان‌گونـه کـه معلـوم اسـت در ایـن چاه‌هـا مـرز سـکانس‌ها در مقایسـه بـا لاگ‌هـای گاما،نوتـرون و سـونیک قابـل رؤیـت بـوده و هرجایـی کـه دارای افزایـش بوده‌انـد در لایه‌هـای چاه‌پیمایـی چگالـی کاهـش داشـته و از آن طـرف در مقایسـه بـا CWT بـوده و در ایـن حالـت دارای تطابـق بـوده و نمودارهـا مطابقـت دارنـد. درتمامـی چاه‌هـا میـزان CWT بـرای مـا بیـن ۱ تـا ۶۴ بـوده و در تمامـی سـکانس‌ها میـزان CWT بـا تغییـر رنـگ همـراه بـوده کـه ایـن میـزان تغییـر رنـگ بـا لاگ‌هـای نوتـرون، گامـا و سـونیک کـه افزایشـی بوده‌انـد و لاگ چگالـی کـه کاهشـی بـوده اسـت کامـلاً مطابقـت دارد. در همیـن راسـتا همان‌گونـه کـه می‌بینیـم در جاهایـی کـه مـا دارای MFS بوده‌ایـم میـزان گامـا نیـز افزایشـی بـوده اسـت کـه می‌تـوان بیـان نمـود زیـرا لایـه گامـا تشـکیل یافتـه اسـت کـه دارای پتاسـیم توریـوم و اورانیـوم اسـت میـزان رادیواکتیـو در اینجـا بـالا بـوده و ایـن منطقـه می‌توانـد دارای لایه‌هـای شـیلی غنـی از مـواد آلـی باشـد. حـال آنکـه حتـی در جاهایـی کـه میـزان لاگ نوتـرون و صوتـی افزایـش داشـته و در طـرف دیگـر، میـزان لاگ چگالـی کاهـش داشـته اسـت و میـزان لاگ گامـا نیـز کاهشـی بـوده می‌تـوان بیـان نمـود ایـن مناطـق مناطـق رسـی کـم متخلخـل هسـتند کـه در اسـکالوگرام ایـن مناطـق به‌صـورت روشـن به‌خوبـی قابـل مشـاهده هسـتند.



شــکل ۷ نتایـج اعمــال تبدیـل موجـک پیوسـته CWT بـرروی لاگ‌هـای GR, NPHI,DT همـراه بـا سـتون سنگ‌شناسـی و سـیالات بـرای سـازندهای دالان و کنـگان



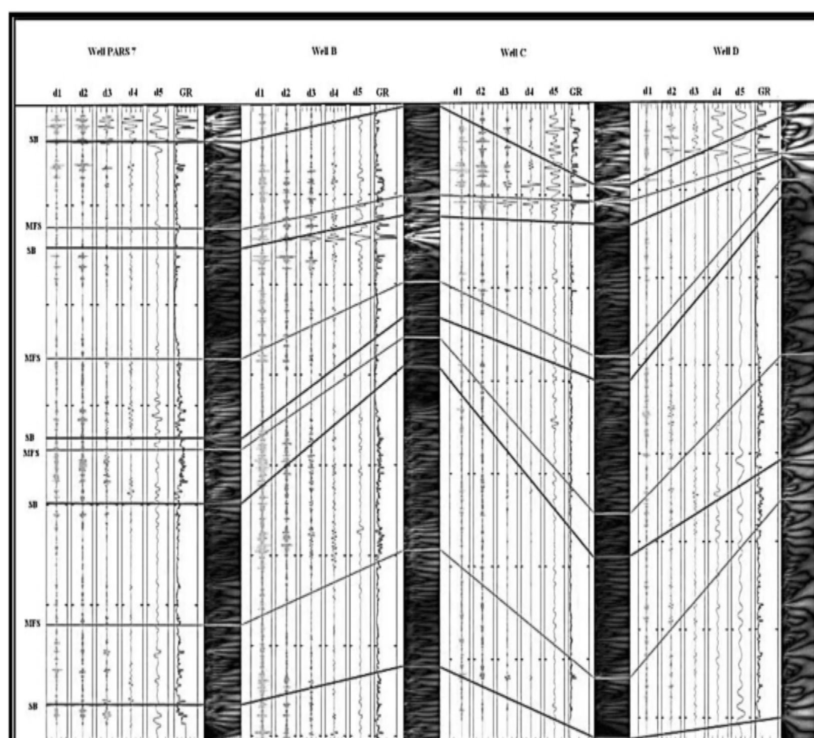
شکل ۸ نتایج اعمال DWT برروی لاگ‌های GR, NPHI,DT همراه با ستون سنگ‌شناسی و سیالات برای سازندهای دالان و کنگان

در زمان حرکت حداکثر خط ساحلی به‌سمت خشکی بسیاری از رسوبات دانه ریز مانند رس و شیل رسوب می‌کنند. به‌دلیل وجود شیل و رس‌های فعال رادیواکتیو و غالباً آلی، MFS با خواندن بیشترین اشعه گاما از جمله CGR (لاگ گاما اصلاح شده) یا SGR (مجموع لاگ گاما) و از این رو حجم بالاتر شیل نشان داده می‌شود. بر این اساس انتظار می‌رود که حداکثر رخداد شیلی با حداکثر سطح سیلابی در ارتباط باشد در حالی که فواصل آهکی و دولومیتی آزاد رس با تخلخل زیاد با مرزهای سکانسی انطباق دارد. شیل تخلخل بالاتر و خواندن چگالی کمتری را نشان می‌دهد. مرز سکانسی یک منطقه با تخلخل بالا است که با لاگ گاما پایین‌تر، تخلخل بیشتر نوترون پس از اصلاح اثر شیل، زمان انتقال صوتی بالاتر و لاگ چگالی کم مشخص می‌شود. بر این اساس، مرزهای سکانسی در ارتباط با لاگ تخلخل پس از در نظر گرفتن تصحیح شیل (لاگ گاما زون متخلخل) است زیرا فواصل شیل حاوی آب محصور است که به اشتباه به‌عنوان تخلخل در لاگ نوترون تفسیر می‌شود. در چاه D همانطور که می بینیم اسکالوگرام گاما در دو مرزسکانسی مطابقت خوبی دارد و به‌خوبی معلوم است درحالی‌که در دو مرز دیگر به‌خوبی آن دو مرز قبلی نیست و مرزهای سکانسی در اسکالوگرام نوترون در هر چهار سکانس به‌خوبی قابل رویت و نمایش می‌باشند. حال آنکه در چاه B در برخی نقاط اسکالوگرام گاما به‌خوبی با سکانس‌های معلوم شده تطابق دارد ولی در برخی نقاط دیگر نیز تطابق بوده ولی رنگ اصلی آن به تیرگی و وضوح در سکانس‌های قبلی نیست ولی با این حال می‌توان دریافت که در هر مرزسکانس اسکالوگرام تیره و روشن می‌شود.

در چاه C نیز چهار سکانس تشخیص داده شد که در آن اسکالوگرام گاما و نوترون به خوبی و وضوح خوب قابل مشاهده است ولی فقط یک سکانس‌ها در اسکالوگرام سونیک مشاهده می‌شود. دیگر سکانس‌ها در اسکالوگرام سونیک به‌خوبی قابل رویت نیستند. در پارس جنوبی ۷ نیز همان‌گونه که در چاه C بیان شد ما دارای چهار سکانس اصلی هستیم که با اسکالوگرام گاما و نوترون تطابق داشته و به‌خوبی قابل رویت بوده ولی در لاگ سونیک در اسکالوگرام سونیک به‌خوبی مشاهده نمی‌شود و ما در اینجا دارای ضعف می‌باشیم. حال همان‌طور که در شکل معلوم است برای تمامی چاه‌ها نمودار تبدیل موجک گسسته و تبدیل موجک پیوسته رسم گردیده است. از طریق انطباق MFS و SB بین آنها یک ارتباط مشترک به‌وجود آمده به‌طوری که در هر چهار چاه میزان MFS را به‌همدیگر با یک خط وصل نموده و در ادامه تمامی مرزهای سکانسی SB را با هم انطباق می‌دهیم. حال می‌توانیم ببینیم تمامی سکانس‌ها در چهار چاه با همدیگر چگونه در ارتباط هستند که با همین در ارتباط بودن تمامی سکانس‌ها می‌توان عمق هر سکانس در هر چاه و تفاوت عمقی هرکدام از سکانس‌ها در هر چهار چاه را مشخص نموده و بتوانیم تعیین نماییم. چیزی که معلوم است، ارتباط قابل قبول بین سکانس‌ها تعیین شده در هر چهار چاه و تعیین مرز سکانس‌ها و سکانس‌های اصلی در هر چهار چاه می‌باشد. برای این منظور ابتدا ضرایب موجک گسسته و پیوسته به‌صورت جداگانه روی هم چیده شده و نرمال‌سازی شده‌اند. پس از آن هردو CWT و DWT برروی حاصل ضرب ضرایب انباشته اعمال شدند. با استفاده از روش‌های موجک ترکیبی، توافق خوبی بین مرزهای سکانسی تعیین شده وجود دارد (شکل ۹).

نتیجه‌گیری

برای هر یک از چاه‌ها میزان CWT و DWT آنها در کنار همدیگر رسم گردیده است که با توجه به‌وجود لاگ‌های چاه‌پیمایی صوتی، نوترون و گاما



شکل ۹ انطباق سیستم تراکت‌های چاه‌ها A,B,C,D براساس ضرایب موجک ترکیبی CWT-DWT در منطقه مورد مطالعه

چهار سکانس رده سوم در آنها تشخیص داده شده است که معمولاً در مرزهای سکانسی دارای محیط‌های متخلخل بوده و میزان لاگ نوترون و صوتی در آنها نیز زیاد می‌باشد و میزان لاگ گاما پایین و چگالی کم (زون متخلخل کم رس) است. در این مطالعه، مرزهای سکانسی با اوج زون متخلخل انطباق دارد که با رنگ‌های کم نور روی اسکالوگرام مشخص می‌شود. هنگام ارتباط پیک تخلخل زیاد موجود در مرزهای سکانسی براساس داده‌ها و لاگ‌های چاه‌پیمایی موجود باید دقت نمود زیرا بخشی از تخلخل بالاتر خود می‌تواند ناشی از شکستگی، انحلال و تبلور مجدد در دیاژنز باشد که شکستگی‌های دیاژنزی این تخلخل‌های مناسب را به‌وجود آورده باشند. از طرف دیگر، در این ۴ سکانس دارای MFS هستیم که خود مناطق MFS دارای میزان لاگ گامای بالا بوده و نشان‌دهنده این است که در این مناطق رادیواکتیو وجود داشته و این مناطق دارای میزان اورانیوم بالایی هستند که خود این امر نشان‌دهنده لایه‌های شیلی غنی از مواد آلی باشد. حال آنکه وجود تبدیل موجک پیوسته خود امر بسیار مفید و مؤثر در تشخیص سطح حداکثر سیلابی MFS است که از تطبیق آن با نمودار سیگنال موجود می‌توان MFS و همچنین SB مرز سکانسی را تشخیص داد. همچنین، سطح حداکثر سیلابی MFS از ارتباط بین بیشترین و کمترین نمودار سیگنال در تبدیل موجک گسسته قابل تشخیص خواهد بود. زمانی‌که شما دارای ۵ نمودار جزئی و یک نمودار as هستید که از جمع آنها می‌توان نمودار گاما را بازسازی نموده و آنها را مقایسه نمایید، در نمودار as در مرز سکانس‌ها همانگونه که مشاهده کردید دارای میزان نوترون بالایی خواهیم داشت که این خود می‌تواند به خاطر نوع لیتولوژی در منطقه دالان و کنگان باشد. حال همان‌گونه که بیان شد می‌توان دریافت که با به دست آوردن میزان تبدیل موجک پیوسته و مقایسه آن با تبدیل موجک گسسته در کنار لاگ‌های چاه‌پیمایی میتوانیم سکانس‌ها را بخوبی و به‌طور کامل تشخیص داده و بیان نمائیم.

تبدیل موجک پیوسته لاگ گاما، نوترون و لاگ صوتی در برجسته‌سازی حداکثر سطح سیلابی موفق شناخته شده است. ضرایب CWT در مقیاس پایین (به‌سمت ۱) با ویژگی‌های مقیاس ریز در بردار سیگنال انطباق دارند. مقادیر مقیاس بالا (به‌سمت ۶۴) موجک را کشیده و با محتوای فرکانس پایین سیگنال ارتباط بهتری دارد. ضرایب CWT در مقیاس بالا ویژگی‌های مقیاس درشت را در سیگنال ورودی ازلاگ چاه نشان می‌دهد. با استفاده از CWT، حداکثر سطح سیلابی از هر دو محتوای فرکانس بالاو فرکانس پایین سیگنال‌ها با موفقیت شناخته می‌شود.

مراجع

[1]. Alsharhan, A.S. (2006). Sedimentological character and hydrocarbon parameters of the middle Permian to Early Triassic Khuff Formation,United Arab Emirates, GeoArabia, 11,121-158.
[2]. Mehrabi, H., Mansouri. M., Rahimpour-Bonab, H., Tavakoli, V., & Hassanzadeh, M. (2016). Chemical compaction features as potential barriers in the Permian-Triassic reservoirs of Southern Iran, Journal of Petroleum Science and Engineering, 145, 95-113.
[3]. Tavakoli, V., Rezaei, M., & Rahimpour-Bonab, H. (2021). Comparsion of different permeability estimation models based on pore throats in Dalan and Kangan Formations, the Central Persian Gulf, Journal of Petroleum Research.
[4]. Nazemi, M., Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., & Sharifi-Yazdi, M. (2021) Integrating petrophysical attributes with saturation data in a geological framework, Permian-Triassic reservoirs of the central Persian Gulf, Journal of African Earth Sciences, 179, 104203.
[5]. Falahatkhah, O., Kadkhodai, A., Ciabeghodsi, A.A., & Mingsong, Li. (2021) Cyclostratigraphy of the lower Triassic Kangan Formation in the Salman gas field,eastern Persian Gulf,Iran, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 561, 110045.
[6]. Xia, L., Yiren, F., Shaogui, D., & Tongshan, W. (2009). Automatic demarcation of sequence stratigraphy

using the method of well logging multiscale data fusion, Petroleum Exploration and Development, 36,221-227.
[7]. Prokoph, A., & Thurow, J. (2000). Diachronous pattern of Milankovitch cyclicity in late Albian pelagic marlstones of the North German Basin, Sedimentary Geology, 134, 287-303.
[8]. Niebuhr, B., & Prokoph, A. (1997). Periodic-cyclic and chaotic successions of Upper Cretaceous (Cenomanian to Campanian) pelagic sediments in the North German Basin, Cretaceous Research,18: 731-750.
[9]. Soroush, H., Rasouli, V. & Tokhmchi, B. (2010). A data processing algorithm proposed for identification of breakout zones in tight formations, A case study in Barnett gas shale, Journal of Petroleum Science and Engineering, 74, 154-162.
[10]. Octavian Catuneanu & Massimo Zecchin (2016) Unique vs. non-unique stratal geometries: Relevance to sequence stratigraphy, Sequence stratigraphy, Marine and Petroleum Geology, Elsevier, 78, 184-195, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.09.019.
[11]. Catuneanu, O. (2017). Sequence stratigraphy: Guidelines for a standard methodology. In Stratigraphy & timescales, 1st edition, Chapter One, University of Alberta, Edmonton, Canada, 2, 1-57. ISSN: 2468-5178
[12]. Catuneanu, O. (2019). Model-independent sequence stratigraphy. Earth-science reviews, 188, 312-388, doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.017.
[13]. Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J.P., Blum, M.D., Dalrymple, R.W., Eriksson, P.G. & Winker, C. (2009) Towards the standardization of sequence stratigraphy, Earth-Science Reviews, 92(1-2): 1-33, doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.003.
[14]. Version, C. (2010). C User Guide, Enres International Company.
[۱۵]. رحمانی، ع. (۱۳۹۱). آشنایی با نرم‌افزار سیکلولاگ و کاربردهای آن در صنعت نفت مطالعات چینه‌نگاری سکانسی، مطالعه موردی مخزن آسماری میدان نفتی پارسی، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، ۱۹.
[16]. Wang, S., Qingchun, J., Zhiyong, C., Zecheng, W., Hua, J., Congsheng, B., Qingfu, F., & Yulin, W. (2015). Sequence stratigraphic features of the Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and their controls on source rocks and reservoirs, Natural Gas Industry, 2(5): 421-429, doi.org/10.1016/j.ngib.2015.09.018.
[17]. Yuan, R., Zhu, R., Xie, S., Hu, W., Zhou, F., & Yu, T. (2019). Utilizing maximum entropy spectral analysis (MESA) to identify Milankovitch cycles in Lower Member of Miocene Zhujiang Formation in north slope of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea, De Gruyter, Open Geosci, 11, 877-887, /doi.org/10.1515/geo-2019-0068.
[18]. Aali, J., Rahimpour-Bonab, H., & Kamali, M. R. (2006). Geochemistry and origin of the world›s largest gas field from Persian Gulf, Iran, Journal of Petroleum Science and Engineering, 50,(3-4): 161-175, doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.004.
[19]. Alsharhan, A. S. & Nairn, A. E. M. (1997). Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East, Elsevier, Netherlands, 843.
[20]. Al-Jallal, I. A. (1995). The Khuff Formation: Its regional reservoir potential in Saudi Arabia and other Gulf countries, depositional and stratigraphic approach, in M. I. Al-Huseini, ed, Geo'94, Middle East Petroleum Geosciences: Bahrain, Gulf PetroLink, 1, 103-119.
[21]. Koehrer, B., Heymann, C., Prousa, F. & Aigner, T. (2010). Multiple-scale facies and reservoir quality variations within a dolomite body- Outcrop analog study from the Middle Triassic, SW German Basin, Marine and Petroleum Geology, 27(2): 386-411.
[22]. Rahimpour-Bonab, H., Asadi-Eskandar, A., & Sonei, R. (2009). Effects of the Permian–Triassic boundary on reservoir characteristics of the South Pars gas field, Persian Gulf, Geological, 44(3): 341-364, doi.org/10.1002/gj.1148.
[23]. Rahimpour-Bonab, H., Esrafili-Dizaji, B., Tavakoli, V. (2010). Dolomitization and anhydrite precipitation in Permo-Triassic carbonates at the South Pars gasfield, offshore Iran: controls on reservoir quality, Journal of Petroleum Geology, 33(1): 43-66, doi.org/10.1111/j.1747-5457.2010.00463.x.
[24]. Ziegler, M. A. (2001). Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian Plate and its hydrocarbon occurrences, Geo -Arabia, 6 (3): 445-504.
[25]. Szabo, F. & Kheradpir, A. (1978). Permian and Triassic stratigraphy, Zagros basin, south-west Iran, Journal of Petroleum Geology, 1(2): 57-82, doi.org/10.1111/j.1747-5457.1978.tb00611.x.
[26]. Kashfi, M.S. (1992). Geology of the Permian "Super-Giant" gas reservoirs in the greater Persian Gulf area, Journal of Petroleum Geology, 15(3), 465-480.
[27]. Konert, G., Afifi, A.M., Al-Hajri, S.A., de Groot K.M., Al Naim A.A., & Droste, H.J. (2001). Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Arabian Plate, AAPG Memoir,74, 483-515.
[28]. Edgell, H. (1996). Salt tectonism in the Persian Gulf basin, In: Alsop, I, Blundell, D & Davison, I (Eds) Salt Tectonics, Geological Society, London, Special Publications, 100: 129-151.

[29]. Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M., Moallemi, A., & Monibi, S. (2006), Upper Dalan member and Kangan formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran, Depositional System, Biostratigraphy and Stratigraphic Architecture, GeoArabia, 11(2), 75-176.
[30]. Kadkhodaie, A., & Rezaee, R. (2017). Intelligent sequence stratigraphy through a wavelet-based decomposition of well log data, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 40, 38-50.
[31]. Matlab user's guide (2015). Wavelet Transform Toolbox, The Mathworks Inc.
[32]. Chanh, S.G., Yu, B., & Vetterli, M. (2000). Adaptive wavelet thresholding for image denoisingand compression, IEEE Trans, Image Process, 9,1532-1546.
[33]. Nio, S. D., Brouwer, J.H., Smith, D.G., De Jong, M.G., Bohm, A.R. (2005). Spectral trend attribute analysis applications in the stratigraphic analysis of wireline logs, First Break, 23, 7175.
[34]. Nio, S.D., Bohm, A.R., Brouwer. J.H., De Jong, M.G., & Smith, D.G. (2006). Climate stratigraphy, principles and applications in subsurface correlation, EAGE Short Course Series, 1, 1- 130.
[35]. De Jong, M., Smith, D., Djin Nio, S. & Hardy, N. (2006). Subsurface correlation of the Triassic of the UK southern central graben, New Look at an Old Problem, 24(6): 103-109.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۰۵-۸۸

مطالعه رخساره‌ها، محیط رسوبی و زون‌بندی مخزن بخش بالایی سازند سورمه (سازند عرب) در یکی از میادین خلیج فارس

علیرضا شاکری، سمیه پرهام* و کتایون رضایی‌پرتو

گروه پژوهش زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم زمین، پردیس توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

چکیده

سازند سورمه یکی از سازندهای مخزنی عمده در خلیج فارس است. در این پژوهش، رخساره‌ها، محیط‌های رسوبی و فرآیندهای دیاژنتیکی موثر بر این سازند در یکی از میادین موجود در خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت زون‌بندی مخزن انجام گردید. مطالعه رسوب‌شناسی مغزه‌ها و مقاطع نازک ۳ حلقه چاه از این میدان منجر به شناسایی ۸ رخساره شده است. این رخساره‌ها در چهار کمربند رخساره‌ای سوپراتایدال، پهنه جزرومدی، لاگون و تپه‌های سدی زیرآبی نهشته شده‌اند که در یک پلاتفرم کربناته از نوع رمپ هم‌شیب و در شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک ته‌نشست یافته‌اند. فرآیندهای دیاژنتیکی موثر بر این رسوبات شامل میکریتی شدن، دولومیتی شدن، نئومورفیسم، فشردگی، سیمانی شدن و انحلال است. از میان این فرآیندها دولومیتی شدن و انحلال تاثیر مثبت و سیمانی شدن (به ویژه سیمان انیدریتی) و فشردگی تاثیر منفی بر کیفیت مخزنی داشته‌اند. براساس داده‌های سنگ‌شناسی، رخساره‌ها و داده‌های تخلخل و تراوایی، ۶ گروه سنگی در این توالی شناسایی شده است. تلفیق داده‌های مذکور، منجر به تفکیک ۷ زون مخزنی در این توالی گردید که هر کدام نشان‌دهنده یک چرخه به سمت بالا کم‌عمق‌شونده است. هر زون از یک لایه دولومیت با کیفیت مخزنی متوسط تا عالی تشکیل شده که توسط یک لایه انیدریتی پوشیده شده که نقش لایه غیرمخزنی یا سدی دارد. بر این اساس، سنگ‌شناسی، رخساره و دیاژنز به‌ترتیب از عوامل اصلی کنترل‌کننده مخزن در توالی مورد مطالعه است.

کلمات کلیدی: خلیج فارس، سازند عرب، محیط رسوبی، رخساره‌ها، دیاژنز، زون‌بندی مخزن

مقدمه

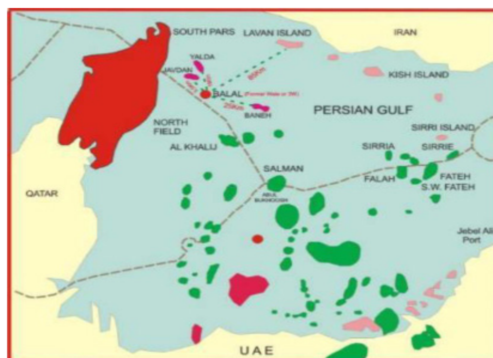
سازند سورمه یکی از سازندهای مخزنی عمده در خلیج فارس است [۱]. بخش بالایی این سازند معادل سازند عرب در جنوب خلیج فارس است. مقطع نمونه سازند عرب در چاه شماره هفت دمام (واقع در میدان دمام در شرق عربستان) با ضخامت ۱۲۷ m و سنگ‌شناسی آهک، دولومیت و انیدریت قرار دارد [۲]. در میدان مورد مطالعه سازند عرب، به‌عنوان مخزن اصلی محسوب می‌شود و بنابراین با هدف بررسی کیفیت مخزنی و تعیین لایه‌های

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی parhams@ripi.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.4856.3169)

مخزن، این بخش از نظر رسوب‌شناسی مورد مطالعه قرار گرفته است. کیفیت مخزنی نهشته‌های کربناته عموماً تحت کنترل چند عامل است که مهم‌ترین آنها نوع رخساره‌های رسوبی، گسترش و توزیع فضایی آنها و همچنین عوامل دیاژنزی ثانویه و شکستگی است [۳-۵]. به‌دلیل پتانسیل بالای نفتی وگستردگی حوضه رسوبی این سازند در خلیج فارس مطالعات متعددی به‌ویژه در کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس از جمله قطر و عربستان صورت گرفته است [۶-۱۱]. در این مطالعات از جنبه‌های مختلف از جمله بررسی توالی‌های کربناته-تبخیری و چینه‌نگاری سکانسی [۴]، توصیف واحد مخزنی عرب-D و ارتباط رخساره‌های ناحیه‌ای و چینه‌نگاری سکانسی در این واحد [۵ و ۶]، ویژگی‌های مخزنی و عوامل کنترل‌کننده تخلخل در کمپلس‌های اایدی [۸ و ۹]پرداخته شده است. برای نمونه در یکی از جدیدترین مطالعات مطالعه ال‌موجل و همکاران [۱۱] به بررسی رسوب‌شناسی چینه‌نگاری سکانسی با وضوح بالای این توالی در بخش مرکزی عربستان پرداخته شده و محیط آن را یک حوضه درون‌شلفی در یک پلاتفرم اپیریک گسترده در محیط گرمسیری و نیمه خشک معرفی کرده است. توالی از چند سکانس رده سوم تشکیل شده است که توسط یوستازی مبتنی بر آب و هوا و تکتونیک کنترل می‌شود. در ایران نیز مطالعاتی روی این سازند و معادل آن یعنی بخش بالایی سازند سورمه در ناحیه زاگرس انجام شده و از جنبه‌های مختلف رسوب‌شناسی [۱۲-۱۶] و عوامل مؤثر بر کیفیت مخزنی [۱۷-۲۲] به بررسی آن پرداخته شده است. در میدان مورد مطالعه این سازند از دولومیت و میان‌لایه‌های انیدریت و سنگ آهک چاکی تشکیل شده است. با توجه به اهمیت مخزنی این سازند، در این مطالعه به بررسی رخساره‌ها و فرآیندهای دیاژنزی و عوامل تأثیرگذار بر روی کیفیت مخزنی، تعیین گروه‌های سنگی و زون‌بندی مخزن این سازند در میدان مورد مطالعه پرداخته شده است. میدان نفتی مورد مطالعه در خلیج فارس در نزدیکی مرز آبی ایران و قطر و در جنوب غرب جزیره لاوان قرار دارد. محدوده میدان مورد مطالعه عبارت از فواصل جغرافیایی ″۳۰ ′۱۲ °۲۶ تا ″۵۰ ′۲۳ °۲۶ عرض شمالی و ″۵۰ ′۲۷ °۵۲ تا ″۲۰ ′۳۶ °۵۲ طول شرقی است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه نشان داده شده است.

چینه‌نگاری سازند سورمه

برش نمونه این سازند در شمال غرب دامنه شمالی کوه سورمه قرار دارد و از دولومیت و آهک دولومیتی تشکیل شده است. بهترین گسترش‌یافتگی سازند سورمه در استان فارس است و همچنین در شرق خوزستان و شمال لرستان این سازند وجود دارد و به‌سمت عراق و جنوب لرستان به‌وسیله شیل، آهک و رسوبات تبخیری جانشین می‌شود [۲۳]. در بخش‌های وسیعی از ناحیه فارس، سنگ‌های ژوراسیک میانی- بالایی از سنگ‌های کربناتی تشکیل شده است.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۰۵-۸۸

این سازند در فارس ساحلی با اندریت هیث پوشیده می‌شود. در محل برش الگو واقع در km ۱۲۰ جنوب غربی شیراز سازند سورمه با m ۷۶۲ ضخامت از سنگ آهک دولومیتی و دولومیت تشکیل شده است. این سازند یک بخش سنگ آهک رسی نازک لایه و با مقاومت ضعیف در قسمت میانی دارد. در اثر لایه آهکی رسی یاد شده، سازند سورمه سیمای سه قسمتی دارد. قسمت پایینی سازند با لایه‌های دارای دوکفه‌ای لیتیوتیس مشخص می‌شود. مرز بالایی سازند یکسان نیست. گاهی این مرز با سازند هیث است و گاهی با سازند فهلیان. در حالت دوم گذار از ژوراسیک بالا به کرتاسه دارای Thimininnid که معرف محیط دریایی عمیق است، به‌عنوان گذر انتخاب می‌شود. زون‌های زیستی نشانگر آن هستند که بخش بالایی سازند سورمه معرف تمام دوره ژوراسیک است و هم‌ارز سازند عرب در عربستان و دیگر کشورهای عربی است و مخزن بسیار عظیم نفت را در خود دارند [۲۴].

روش مطالعه

در این تحقیق حدود m ۳۲۴ از مغزه‌های مربوط به سه حلقه چاه در میدان مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مختلف شامل سنگ‌شناسی، بافت، رخساره‌ها، انواع آلوکم‌ها و درصد آنها و نیز پارامترهای دیاژنتیکی مانند انحلال، انواع تخلخل و درصد آنها ثبت گردیدند. جهت تهیه مستندات از پدیده‌های مختلف، از مغزه‌ها عکس گرفته شد. تعداد ۵۵۴ مقطع نازک از مغزه‌ها تهیه گردید و نمونه‌ها با آلیزارین قرمز به روش دیکسون [۲۵] رنگ‌آمیزی شدند. به منظور بررسی تخلخل، ۱۰ نمونه سرپلاگ برای تزریق اپوکسی رزین آبی انتخاب و از آن مقطع نازک تهیه گردید. مقاطع نازک توسط میکروسکوپ پلاریزان مطالعه شده‌اند. هدف از مطالعه پتروگرافی این سازند شناخت اجزا، بررسی فراوانی و اندازه آنها در هر رخساره و همچنین شناخت و بررسی شواهد دیاژنتیکی در رسوبات سازند مذکور است. در نام‌گذاری نمونه‌ها از طبقه‌بندی دانهام [۲۶] و امری و کلوان [۲۷] استفاده شده است. برای بازسازی محیط رسوبی از مدل ویلسون [۲۸] و فلوگل [۲۹] استفاده گردیده است. از داده‌های تخلخل و تراوایی حاصل از آنالیز معمول مغزه کلیه سرپلاگ‌های موجود جهت بررسی کیفیت مخزنی و ترسیم نمودارها استفاده شد. برای زون‌بندی مخزن از تلفیق داده‌های رسوب‌شناسی، داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه، و لاگ‌های پتروفیزیکی از جمله اشعه گاما، نوترون، چگالی، صوتی استفاده شده است.

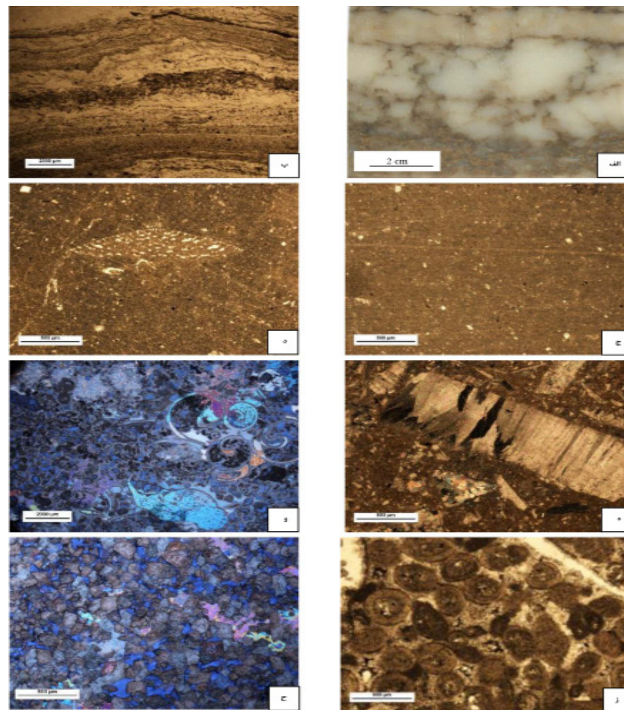
رخساره‌ها

براساس مطالعه مغزه‌ها و مقاطع نازک هفت رخساره در توالی مورد مطالعه مورد شناسایی قرار گرفت. این رخساره‌ها در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. با استفاده از داده‌های تخلخل و تراوایی، به ویژگی‌های مخزنی هر رخساره نیز اشاره شده و دیاگرام تخلخل در برابر تراوایی برای هر رخساره تهیه و ارائه گردیده است.

MF1 – انیدریت

انیدریت به دو صورت عمده در اینتروال مورد مطالعه دیده می‌شود؛ ۱- به‌صورت انیدریت متوسط تا ضخیم لایه که ضخامت آن گاهی به بیش از m ۱ هم می‌رسد. ۲- به‌صورت ندول‌های منفرد در اندازه‌های مختلف به‌صورت پراکنده در ماتریکس دولومیتی. گاهی از به هم پیوستن ندول‌ها بافت انترولیتی ایجاد شده است. گاهی نیز ندول‌های انیدرتی بافت لانه مرغی[1] نشان می‌دهند. سودومورف‌های انیدریت به دلیل جانشینی با ژیپس نیز در مغزه‌ها دیده می‌شود. در مقطع نازک ندول‌های انیدریتی از بلورهای سوزنی با جهت‌گیری موازی تا نیمه‌موازی و بعضا تصادفی تشکیل شده‌اند (شکل ۲- الف).

1. Chicken Wire



شکل ۲ تصاویر رخساره‌های شناسایی شده در ناحیه مورد مطالعه. الف- تصویر ماکروسکوپی (مغزه) از لایه انیدریت با بافت روده‌ای. ب- تصویر میکروسکوپی از رخساره باندستون استروماتولیتی، PPL. ج- رخساره دولومادستون بیوکلستی، PPL. د- رخساره وکستون بیوکلستی، PPL. ه- رخساره پکستون تا رودستون بیوکلستی. XPL. و- گرینستون بیوکلستی اائیدی. PPL. ز- گرینستون اائیدی. PPL. ح- دولوستون بلورین همراه با تخلخل بین‌بلوری PPL.

MF2 - بایندستون استروماتولیتی

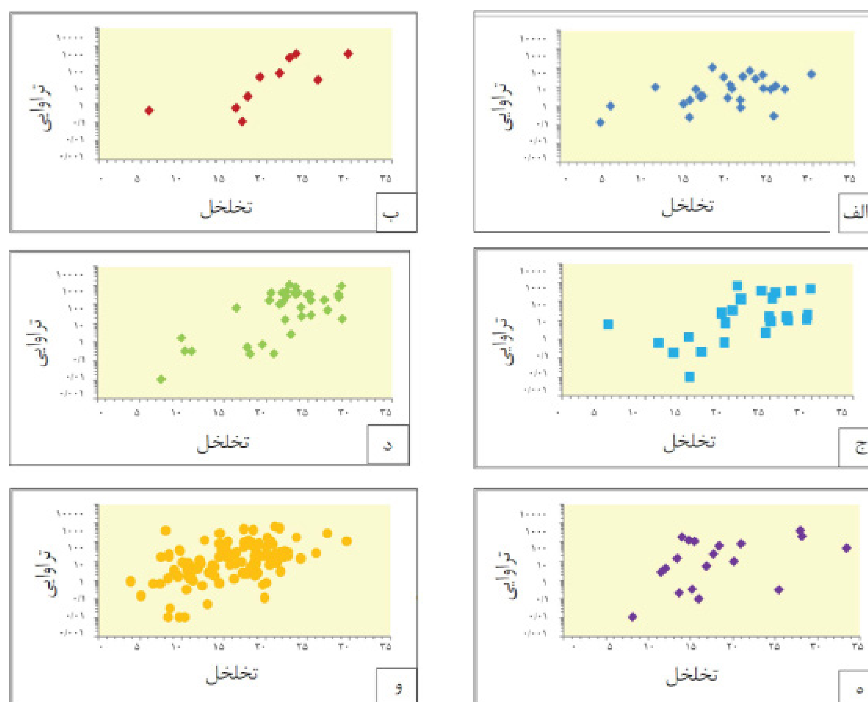
این رخساره از لامیناسیون‌ها و آثار فیلامنت‌های جلبکی به‌صورت نوارهای تیره و روشن تشکیل شده است (شکل ۲- ب). بافت فنسترال در این رخساره مشاهده می‌شود که در غالب موارد با سیمان انیدرتی پر شده است. استروماتولیت‌ها با دولومیت جانشین شده‌اند. جانشنی بافت اولیه با انیدریت نیز در این رخساره معمول است. این رخساره به‌صورت متناوب با لایه‌های انیدریتی دیده می‌شود. نمودار تخلخل تراوایی در شکل ۳- الف ارایه شده است.

MF3 - دولومادستون بیوکلستی

این رخساره متشکل از دولومادستون است که کمتر از ۱۰٪ خرده‌های اسکلتی به‌همراه دارد (شکل ۲- ج). خرده‌های اسکلتی شامل قطعات اکینودرم و پلسی‌پود است. اندازه بلورهای دولومیت ریز بوده و در زیر میکروسکوپ بلورها قابل رویت نیستند. ندول‌های انیدریتی در اندازه‌های مختلف (از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر) به‌طور پراکنده در این رخساره دیده می‌شود. بافت فنسترال، آثار فیلامنت‌های جلبکی و آثار کانی‌های تبخیری در بعضی قسمت‌ها مشاهده می‌شود. جانشینی با انیدریت و برشی شدن ناشی از انحلال بخش‌های انیدریتی از پدیده‌های دیاژنتیکی معمول در این رخساره است. در مغزه دولومادستون سخت و چگال بوده و به رنگ قهوه‌ای روشن تا بژ دیده می‌شود. فرآیندهای انحلال و دولومیتی شدن باعث ایجاد تخلخل‌های حفره‌ای و بین‌بلوری در این رخساره شده که متعاقب آن کیفیت مخزنی در این رخساره افزایش یافته است. میانگین تخلخل در این رخساره ۱۹/۶٪ و میانگین تراوایی ۱۶/۵ mD است (شکل ۳- ب).

MF4 - وکستون تا پکستون بیوکلستی

بافت این رخساره از وکستون تا پکستون در تغییر بوده و آلوکم‌های اصلی این رخساره را خرده‌های فسیلی (۲۰-۵۰٪) تشکیل می‌دهند.



شکل ۳ نمودار تخلخل تراوایی ارایه شده برای رخساره‌های شناسایی شده- الف) رخساره MF2، ب) رخساره MF3، ج) رخساره MF4، د) رخساره MF5، ه) رخساره MF6، و) رخساره MF7

از مهم‌ترین خرده‌های فسیلی مشاهده شده در این رخساره می‌توان به فرامینیفرای بنتیک مانند Miliolid و Textularia sp. اشاره کرد. قطعاتی از جلبک سبز (Clypenia jurassica)، gastropod، echinoderm، bivalve و Stromatoporid سایر اجزایی هستند که در این رخساره وجود دارند. بیوکلست‌ها عمدتا در محیط دریایی تحت تاثیر فرآیند میکریتی شدن قرار گرفته‌اند (شکل ۲- د). پلویید و کوارتز در اندازه سیلت نیز در این رخساره قابل مشاهده است. دولومیتی شدن و انحلال از فرآیندهای دیاژنتیکی هستند که روی این رخساره اثرگذار بوده است. تخلخل حفره‌ای و درون‌دانه‌ای ناشی از انحلال از تخلخل‌های مهم در این رخساره هستند. اگرچه بخشی از تخلخل به‌وسیله سیمان کلسیت اسپاری پر شده است. تخلخل متوسط در این رخساره ۲۰٪ و تراوایی متوسط ۱۱۵/۴ mD است (شکل ۳- ج).

MF5 – پکستون تا رودستون بیوکلستی

این رخساره بافتی دانه‌پشتیبان داشته و از پکستون تا رودستون در تغییر است. خرده‌های اسکلتی جانورانی چون: جلبک سبز، مرجان، گاستروپود، پلسی‌پود و اکینودرم اجزائ اصلی تشکیل دهنده این رخساره هستند. بافت رودستونی از تجمع قطعات با اندازه‌های بیشتر از ۲ mm تا چند سانتی‌متر موجوداتی چون Clypenia jurassica و Coral ایجاد شده است. از آلوکم‌های غیراسکلتی می‌توان به پلویید و اینتراکلست اشاره نمود. دولومیتی شدن یکی از فرآیندهای دیاژنتیکی اصلی است که روی این رخساره اثرگذار بوده و کل رخساره را جانشین کرده است (شکل ۲- ه). رگچه‌های انحلالی، استیلولیت، انواع دولومیت (بی‌شکل، شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار) و آثار آغشتگی به نفت در این رخساره قابل گزارش است. انواع اصلی تخلخل در این رخساره تخلخل‌های انحلالی (حفره‌ای)، بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای است. میانگین تخلخل حدود ۲۱/۶٪ و میانگین تراوایی ۸۲/۸۰ mD است (شکل ۳- د).

MF6 – پکستون و گرینستون بیوکلستی پلوییدی اینتراکلستی

این رخساره بافتی دانه‌غالب و گرینستونی نشان می‌دهد.

اجـزای آن متوسـط تـا درشـت‌دانه گـرد تـا نیمه‌گـرد شـده هسـتند. مهم‌تریـن آلوکم‌هـای آن خرده‌هـای فسـیلی اسـت کـه می‌تـوان بـه خرده‌هـای Clipina jurasiaca، Pelecypod debris، Miliolid، Noutiloculina cf. Circularis، Echinoderam اشـاره نمـود (شـکل ۲- و). آلوکم‌هـا به‌طـور عمـده میکریتـی شـده‌اند. بـه میـزان کمتـر اینتراکلسـت و پلوییـد نیـز در نمونه‌هـا قابـل گـزارش اسـت. سـیمان حاشـیه‌ای هم‌ضخامـت اطـراف آلوکم‌هـا مشـاهده می‌شـود. دولومیتـی شـدن از مهم‌تریـن فرآیندهـای دیاژنتیکـی موثـر روی ایـن رخسـاره اسـت. فرآینـد دولومیتـی شـدن بـه حـدی اسـت کـه در برخـی مـوارد تنهـا شـبحی از آلوکم‌هـا برجـای مانـده اسـت. جانشـینی بـا انیدریـت و انحـلال از فرآیندهـای دیاژنتیکـی موثـر بـر ایـن رخسـاره اسـت. تخلخـل بین‌دانـه‌ای و انحلالـی تخلخل‌هـای اصلـی هسـتند. تخلخـل بین‌دانـه‌ای به‌طـور عمـده بـه وسـیله سـیمان انیدریتـی پـر شـده یـا کاهـش یافتـه اسـت. میانگیـن تخلخـل در ایـن رخسـاره ۲۱/۸٪ و میانگیـن تراوایـی ۲۱۳/۵ mD اسـت (شـکل ۳- ه).

MF8 - دولومیت بلورین

ایـن رخسـاره در مغـزه به‌صـورت دولوسـتون سـخت بـه رنـگ قهـوه‌ای روشـن تـا کرمـی دیـده می‌شـود و بـر اثـر فرآینـد دولومیتـی شـدن ثانویـه تشـکیل شـده اسـت (شـکل ۲- ح). دولومیتـی شـدن به‌صـورت تخریـب کننـده فابریـک سـنگ بـوده و در اکثـر نمونه‌هـا بافـت آهکـی قبلـی از بیـن رفتـه و آلوکم‌هـا قابـل شناسـایی نیسـتند. تخلخـل بین‌بلـوری، دورن‌بلـوری و انحلالـی از مهم‌تریـن تخلخل‌هـای موجـود در ایـن رخسـاره اسـت. تخلخـل در ایـن رخسـاره بیـن ۰/۱٪ تـا ۲۹/۷۳٪ بـا میانگیـن ۱۶/۱٪ و تراوایـی بیـن ۰/۱ تـا ۷۰۰ بـا میانگیـن ۵۹/۸ mD در تغییـر اسـت.

محیط رسوبی

بیشـتر مخـازن کربناتـه منشـا دریایـی دارنـد در نتیجـه تشـخیص محیط‌هـا بـه زیرمحیط‌هـای کوچکتـر دلیـل اصلـی تقسـیم محیط‌هـای دریایـی بـه بخش‌هـای کوچکتـر اسـت [۳]. بازسـازی محیـط رسـوبی دیرینـه براسـاس بررسـی بافـت، عناصـر تشـکیل‌دهنده، سـاختمان‌های رسـوبی و محتـوای فسـیلی کـه در هـر زیرمحیـط در پلاتفـرم کربناتـه تشـکیل می‌شـود و مقایسـه بـا توالی‌هـای تفسـیر شـده معادل‌هـای امـروزی آن امکان‌پذیـر می‌شـود. براسـاس مطالعـات پتروگرافـی انجـام شـده بـرروی مغزه‌هـا و مقاطـع نـازک، ۸ رخسـاره در نمونه‌هـای ایـن سـازند شناسـایی گردیـد. از مقایسـه ایـن رخسـاره‌ها بـا کمربنـد رخسـاره‌ای ویلسـون [۲۸] و فلـوگل [۲۹] چنیـن نتیجـه گرفتـه می‌شـود کـه ایـن رخسـاره‌ها در چهـار کمربنـد رخسـاره‌ای مربـوط بـه محیـط سـوپراتایدال، پهنـه جزرومـدی، لاگـون و تپه‌هـای سـدی بیوکلسـتی و ااییـدی مجـزا تەنشسـت یافته‌انـد. بـر ایـن اسـاس پتروفاسـیس انیدریـت (F1) چـه به‌صـورت لایـه‌ای و چـه به‌صـورت ندولـی و بـا بافت‌هـای روده‌ای[1] و لانه‌مرغـی و MF2 بایندسـتون استروماتولیتی در محیـط سـوپراتایدال و در آب و هـوای گـرم و خشـک نهشـته شـده‌اند [۳۰ و ۳۱]. دولومادسـتون (MF3) بـا شـواهدی چـون دولومیـت ریزبلـور، فابریـک فنسـترال، وجـود ندول‌هـای انیدریـت و آثـار فیلامنت‌هـا جلبکـی در محیـط بـالای پهنـه جزرومـدی نهشـته شـده‌اند [۲۹]. رخسـاره‌های محیـط لاگـون بـا حضـور فرامینیفرهـای بنتیـک فـراوان و متنـوع ماننـد Miliolid ، Noutiloculina cf Circularis، Textularia sp ، Miliolid وجـود گل آهکـی، پلوییـد و جلبـک سـبز (Clipina jurasica) مشـخص می‌شـوند. بـر ایـن اسـاس چنیـن نتیجه‌گیـری می‌شـود کـه رخسـاره‌های MF4 و MF5 در یـک محیـط لاگـون کم‌انـرژی نهشـته شـده‌اند. بافـت دانه‌پشـتیان گرینسـتونی در رخسـاره MF6 و MF7، عـدم وجـود گل کربناتـه و وجـود ااییـد و فراوانـی قطعـات اینتراکلسـتی حاکـی از شـرایط پرانـرژی محیـط اسـت [۲۹ و ۳۲]. وجـود قطعـات فرامینیفـرای کـفـزی و نیـز ویژگی‌هـای مذکـور دال بـر تشـکیل ایـن رخسـاره در تپه‌هـای سـدی زیرآبـی ااییـدی و بیوکلسـتی و کانال‌هـای جزرومـدی اسـت [۲۹ و ۳۲].

1. Entrolithic Fabric

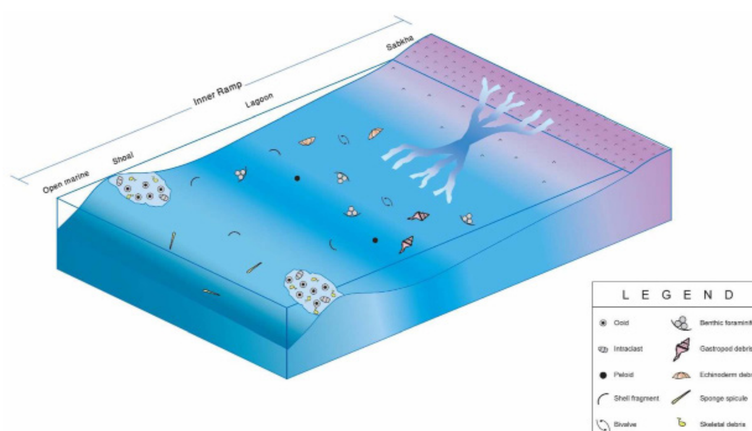
پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۰۵-۸۸

گسترش بالای این رخساره نشان‌دهنده بزرگ بودن و پراکندگی بالای این تپه‌ها در زمان رسوب‌گذاری در پلاتفرم کربناته است. مقایسه مطالعه محیط رسوبی توالی این میدان با سایر مطالعات از جمله مطالعه انجام شده توسط اسعدی و همکاران [۳۳] نشان می‌دهد که بخش‌های رمپ خارجی در این منطقه مشاهده نشده درحالی‌که در مطالعات دیگر این بخش گزارش شده است. بر این اساس یک مدل مفهومی سه‌بعدی برای نهشته شدن رسوبات سازند سورمه در زمان رسوب‌گذاری در شکل ۴ ارایه شده است.

فرآیندهای دیاژنتیکی

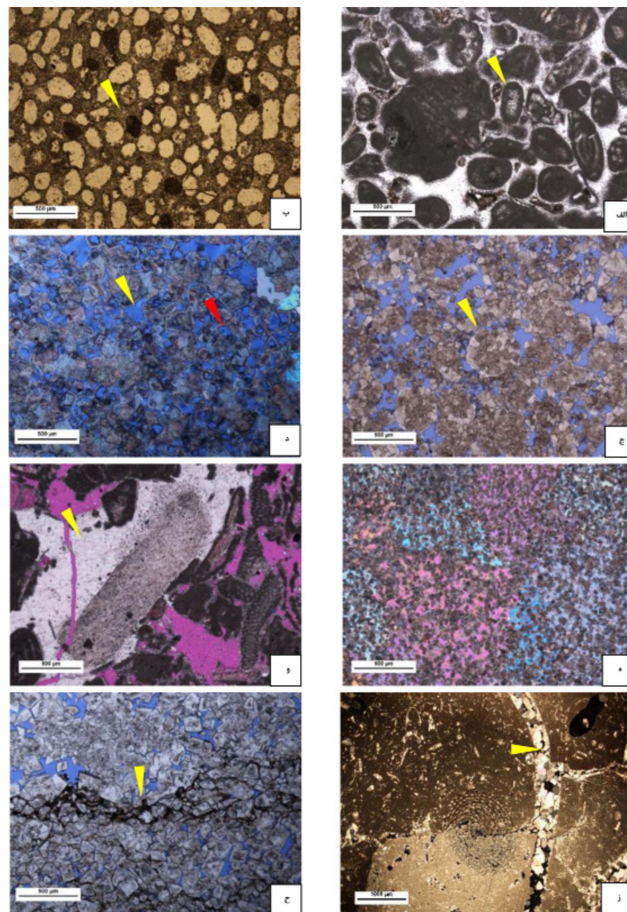
براساس مطالعات انجام شده برروی مغزه‌ها و مقاطع نازک میکروسکوپی فرآیندهای دیاژنتیکی مختلفی روی این سازند تأثیرگذار بوده است. از جمله این فرآیندها می‌توان به میکریتی شدن، دولومیتی شدن، انحلال، سیمانی شدن، نئومورفیسم و فشردگی اشاره کرد. این فرآیندها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. میکریتی شدن: این فرآیند در نتیجه عملکرد جلبک‌ها، قارچ‌ها و باکتری‌ها در محیط دیاژنتیکی دریایی رخ داده است [۳۲]. آلوکم‌های میکریتی شده به‌وفور در رخساره‌های مختلف از جمله MF4 و MF5 دیده می‌شود (شکل ۵- الف).

دولومیتی شدن: این فرآیند مهم‌ترین فرآیند مؤثر بر نمونه‌های سازند عرب است. فرآیند جانشینی بافت آهکی با دولومیت با دو حد انتهایی قابل مشاهده است: ۱) بافت آهکی با حفظ فابریک سنگ، با دولومیت جانشین شده است (شکل ۵-ب). در این نوع دولومیتی شدن، آلوکم‌ها و بافت سنگ قابل تشخیص هستند و جانشینی به‌صورت تقلیدی[1] رخ داده است؛ ۲) دولومیتی شدن تخریب کننده فابریک سنگ بوده و تنها شبحی از آلوکم‌ها باقی‌مانده است (شکل ۵- ج). بلورها به‌صورت شکل‌دار، نیمه‌شکل‌دار و بی‌شکل بوده و تخلخل بین‌بلوری بالایی نشان می‌دهند. علاوه‌بر تخلخل بین‌بلوری، تخلخل درون‌بلوری نیز در این دولومیت‌ها معمول بوده (شکل ۵- د) و تخلخل بالایی ایجاد کرده است. تخلخل درون‌بلوری در بلورهای دولومیتی دیده می‌شود که دارای زون‌بندی بودند و بخش مرکزی اینکلوژن‌های بافت آهکی قبلی را دارا بوده است. بخش مرکزی این بلورها در برابر آب‌های تحت اشباع از دولومیت مقاومت کمتری داشته و در طی مراحل دیاژنز دچار انحلال شده و تخلخل دورن‌بلوری ایجاد کرده است [۳۴]. انحلال: این فرآیند یکی از عوامل ایجاد تخلخل حفره‌ای و قالبی به‌ویژه قالب اایید در توالی مورد مطالعه شده است (شکل۵- ب).



شکل ۴ مدل رسوبی شماتیک سازند عرب در میدان مورد مطالعه

1. Mimetic



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از فرآیندهای دیاژنتیکی. الف) فرآیند میکریتی‌شدن قطعات فسیلی. PPL. ب) دولومیتی شدن با حفظ فابریک سنگ در یک گرینستون اائیدی. انحلال باعث ایجاد تخلخل قالبی شده و سیمان انیدریتی بخشی از تخلخل‌های قالبی را پر کرده است. XPL. ج) دولومیتی شدن به‌صورت تخریب کننده فابریک سنگ. تنها شبحی از آلوکم‌ها (اائید) باقی‌مانده است. د) تخلخل بین‌بلوری (فلش زرد) و درون‌بلوری (فلش قرمز) در دولومیت‌های جانشینی تخریب‌کننده فابریک سنگ. PPL. ه) سیمان انیدریتی به‌صورت فراگیر بلورهای دولومیت را احاطه کرده است. و) سیمان سین‌تکسیال اطراف خرده اکینودرم. XPL. ز- سیمان کلسیت اسپاری بخشی از تخلخل‌های موجود را پرکرده است. PPL. ح) رگچه‌های انحلالی PPL

سیمان انیدریت فراگیر: این نوع سیمان گستردگی بالایی در نمونه‌های مورد مطالعه دارد و از عوامل اصلی کاهنده میزان تخلخل در نمونه‌ها است و بخشی از تخلخل‌های قالبی انحلالی و بین‌بلوری را پر کرده است (شکل ۵- ه).

سیمان سین‌تکسیال: بلور کلسیت به‌صورت هم‌بعد اطراف خرده‌های اکینودرم تشکیل شده است (شکل ۵- و). سیمان کلسیت اسپاری: این سیمان که بیشتر در دولومیت‌های بلورین مشاهده می‌شود یک سیمان تاخیری بوده و بخشی از فضاهای خالی بین‌بلوری را کاهش داده است (شکل ۵- ز).

نئومورفیسم: به‌صورت افزایش اندازه بلورها (نئومورفیسم افزایشی) در دولومیت‌ها دیده می‌شود و با ایجاد تخلخل بین‌بلوری نقش اصلی در افزایش کیفیت مخزنی در بافت‌های بلورین داشته است.

فشردگی: به‌طور عمده به‌صورت رگچه‌های انحلالی و استیلولیت در توالی‌های مختلف مشاهده می‌شود (شکل ۵- ح) و به‌طوربخشی تا کامل فضای‌های خالی را پر کرده یا کاهش داده است.

تعیین گروه‌های سنگی

تعیین گروه‌های سنگی زمین‌شناسی براساس تلفیق معیارهای مختلفی که روی کیفیت مخزنی اثرگذار بوده انجام شده است.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۰۵-۸۸

این معیارها شامل سنگ‌شناسی، رخساره، دیاژنز و داده‌های تخلخل و تراوایی حاصل از آنالیز مغزه بوده است (شکل ۶). در سازند عرب از نظر سنگ‌شناسی سه گروه سنگی قابل جدایش است. (۱) دولومیت که عمده توالی را تحت تاثیر خود قرار داده و کیفیت مخزنی بالایی ایجاد کرده است. (۲) انیدریت به‌صورت سخت، محکم و فشرده با بافت توده‌ای تا متوسط لایه و ندولار که تخلخل و تراوایی نداشته و به‌عنوان واحد سدی در نظر گرفته می شود. (۳) سنگ آهک چاکی و سفید رنگ که به‌شدت ترد و شکننده است. نوع دولومیت و اندازه بلورهای آن در ایجاد کیفیت مخزنی تاثیر گذار بوده است. بنابراین براساس این ویژگی‌ها انواع مختلف گروهای سنگی ایجاد شده‌اند (جدول ۱).

به‌طورکلی، دولومیت مشاهده شده در این سازند را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد:

(۱) دولومیت انتخاب کننده فابریک سنگ، که در آن دولومیت به‌طور تقلیدی جایگزین سنگ آهک قبلی شده و بافت و ساختار قبلی حفظ شده است. این نوع را نیز می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم کرد:

الف- **فابریک‌های گل پشتیبان و فابریک‌های دانه پشتیبان**.

(۲) دولومیت غیرانتخابی فابریک سنگ که در آن دولومیتی شدن به‌صورت غیرانتخابی و غیرتقلیدی جانشین سنگ شده و تنها شبحی از آلوکم‌های قبلی وجود دارد. در این نوع دولومیتی شدن، براساس اندازه بلورها سه گروه شامل دولومیکریت، دولومیکرواسپاریت و دولواسپاریت قابل شناسایی است. این گروه‌ها در ادامه مورد بررسی قرار می گیرند:

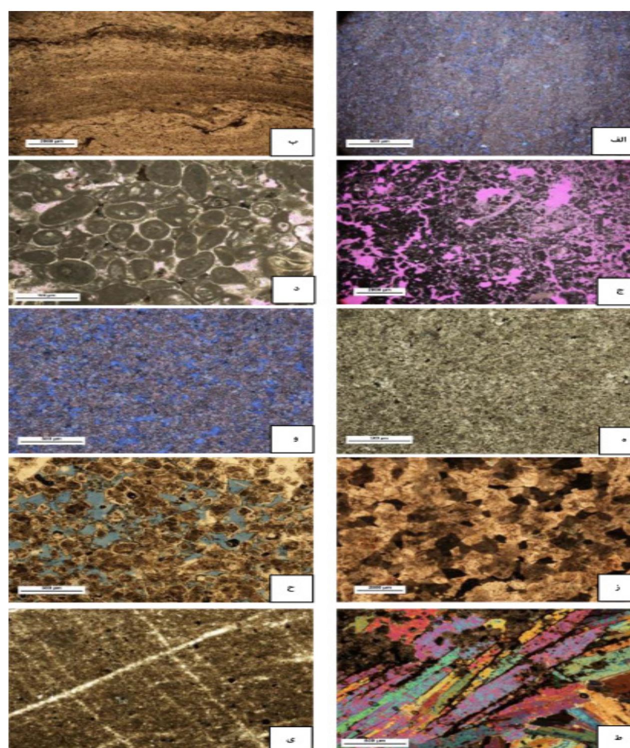
گروه سنگی a1 (RT1)- دولومیتی شدن به‌صورت تقلیدکننده فابریک سنگ، بافت گل‌پشتیبان و تخلخل بالا: این گروه از رخساره‌های دولومادستون و وکستون تا پکستون دولومیتی تشکیل شده است (شکل ۷- الف).

شکل ۶ ستون چینه‌شناسی، رسوب‌شناسی و پتروگرافی سازند عرب در یکی از چاه‌های میدان مورد مطالعه

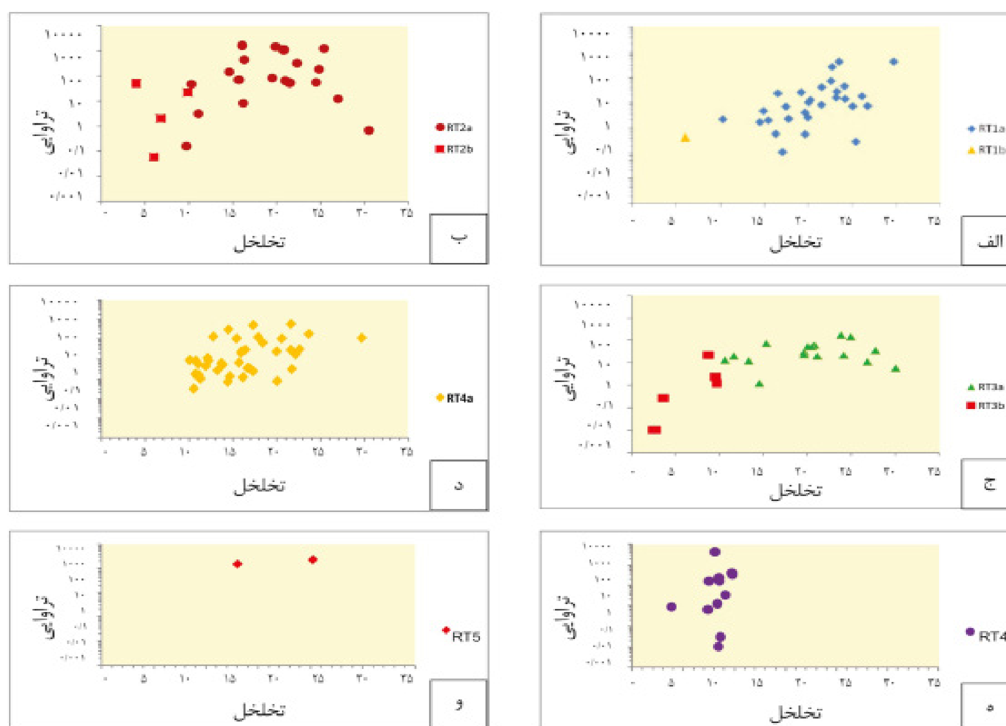
جدول ۱ گروه‌های سنگی شناسایی شده در توالی مورد مطالعه

ردیف	گروه سنگی	سنگ‌شناسی	ویژگی	میانگین تخلخل (٪)	میانگین تراوایی (mD)	کیفیت مخزنی
۱	RT1a	دولومیت	دولومادستون، وکستون تا پکستون با تخلخل بین‌بلوری بلورهای شکل‌دار نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل تخلخل حفره‌ای	۲۰/۵	۴۷/۲	خوب
۲	RT1b	دولومیت	دولومادستون، وکستون تا پکستون	۶/۰	۰/۴	ضعیف
۳	RT2a	دولومیت	بافت دانه‌پشتیبان (گرینستون اائیدی بیوکلستی)، تخلخل‌های حفره‌ای، قالبی، بین‌دانه‌ای و بین‌بلوری (انحلال گسترده)	۲۱/۹	۱۳۵/۱	عالی
۴	RT2b	دولومیت	بافت دانه‌پشتیبان (گرینستون اائیدی بیوکلستی) دانه‌ها به هم فشرده و تخلخل کم، با انیدریت پرشده یا کاهش یافته	۷/۸	۹/۴	ضعیف
۵	RT3a	دولومیت	دولومیکرواسپاریت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، اندازه بلورها (µ ۶۰ –۴۰) با تخلخل بین‌بلوری متصل	۱۸/۷	۴۲/۲	خوب
۶	RT3b	دولومیت	دولومیکرواسپاریت بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار، اندازه بلورها (µ ۶۰ –۴۰)، بدون تخلخل بین‌بلوری یا تخخل پر شده با سیمان انیدریتی	۷/۰	۰/۶	ضعیف
۷	RT4a	دولومیت	دولواسپاریت متشکل از بلورهای درشت (µ ۳۰۰ –۶۰) با تخلخل بین‌بلوری بالا و متصل به هم، و تخلخل حفره‌ای	۱۶/۰	۶۱/۸	بسیار خوب
۸	RT4b	دولومیت	دولواسپاریت بلورهای به هم پیوسته یا پر شده با سیمان انیدریتی	۸/۱	۴۷/۰۷	ضعیف
۹	RT5	انیدریت توده‌ای تا لایه‌بندی متوسط، ندولار	سخت، فشرده بدون تخلخل و تراوایی	–	–	ضعیف سد
۱۰	RT6	شیل تا شیل آهکی خاکستری روشن و سنگ آهک چاکی	این گروه سنگی به دلیل خاصیت تردی و شکنندگی بالا امکان تهیه نمونه پلاگ از آن وجود نداشته و تنها یک نمونه موجود است	–	–	ضعیف

دولومیت‌ها از بلورهای ریز، بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار تشکیل شده و تخلخل بین‌بلوری (تا ۲۵٪ و میانگین ۷/۲٪) در این گروه وجود دارد (شکل ۸- الف). تخلخل حفره ای تا ۱۴٪ در آن دیده شده و تخلخل‌های درون‌دانه‌ای و قالبی و فنسترال نیز وجود دارند. گروه سنگی b1 (RT1b)- دولومیتی شدن به‌صورت تقلید کننده فابریک سنگ، بافت گل‌پشتیبان و تخلخل پایین: این گروه دولومادستون، وکستون تا پکستون دولومیتی و باندستون استروماتولیتی با تخلخل و تراوایی پایین را شامل می‌شود (شکل ۷- ب). مقدار تخلخل و تراوایی برای یک نمونه موجود است و به‌ترتیب ۵/۹۸٪ و ۰/۴۱ mD است. در این گروه تخلخل وجود نداشته یا در صورت وجود با سیمان انیدریتی پوئیکیلوتوپیک کاهش یافته و بنابراین کیفیت مخزنی این گروه سنگی ضعیف است (شکل ۸- الف).



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی از گونه‌های سنگی شناسایی شده در توالی مورد مطالعه. الف) گروه سنگی a1 (RT1a). ب) گروه سنگی b1 (RT1b). XPL. ج) گروه سنگی PPL (RT2a) a2. د) گروه سنگی b2 (RT2b). PPL. ه) گروه سنگی a3 (RT3b). XPL. و) گروه سنگی PPL.(RT3b) b3. ز) گروه سنگی PPL .(RT4b) a4. ح) گروه سنگی 4b (RT4b). PPL. ط) گروه سنگی ۵ (RT5). ی) گروه سنگی ۶ (RT6)



شکل ۸ نمودار تخلخل تراوایی ارایه شده برای هر گروه سنگی. الف) نمودار تخلخل تراوایی RT1a و RT1b. ب) نمودار تخلخل تراوایی RT2a و RT2b. ج) نمودار تخلخل تراوایی RT3a و RT3b. د) نمودار تخلخل تراوایی RT4a. ه) نمودار تخلخل تراوایی RT4b. و) نمودار تخلخل تراوایی RT5

گروه سنگی 2a -(RT1a) دولومیتی شدن به‌صورت تقلید کننده فابریک سنگ، بافت دانه‌پشتیبان و تخلخل بالا: بافت‌دانه‌پشتیبان بوده و عمدتا از گرینستون اائیدی بیوکلستی تشکیل شده است (شکل ۷- ج). تخلخل بین ۱۰ تا ۳۳/۲۴٪ بوده و میانگین ۲۱/۹۱٪ است. تراوایی ۰/۰۱ تا ۱۰۶۷ mD و میانگین ۱۳۵/۱۰ است. تخلخل‌های بین‌دانه‌ای قالبی، حفره‌ای، و بین‌بلوری و ماتریکس در این گروه دیده می‌شود. انحلال گسترده یکی از عوامل مهم ایجاد تخلخل محسوب می‌شود (شکل ۸- ب).
این گروه کیفیت مخزنی عالی نشان می‌دهد.

گروه سنگی 2 b - (RT2b) دولومیتی شدن به‌صورت تقلید کننده فابریک سنگ، بافت دانه پشتیبان و تخلخل پایین: بافت این گروه دانه‌پشتیبان بوده و گرینستون اائیدی بیوکلستی تشکیل شده اما دانه‌ها به‌هم فشرده بوده و تخلخل بین دانه‌ای پایین است (شکل ۷- د). در برخی نیز تخلخل‌های اولیه با سیمان انیدریت پرشده یا کاهش یافته است. تخلخل بین ۵/۵۹ تا ۹/۰۷٪ بوده و میانگین ۷/۸۴٪ است. تراوایی ۰/۰۱ تا ۱۸/۱۱ mD و میانگین ۴/۹ است. تخلخل و کیفیت مخزنی این گروه ضعیف ارزیابی می‌شود (شکل ۸- ب).

گروه سنگی 3 a - (RT3a) دولومیتی شدن در اندازه دولومیکرواسپاریت به‌صورت غیرتقلیدی و تخریب کننده فابریک سنگ، بافت دانه‌پشتیبان و تخلخل بالا: این گروه دولومیکرواسپاریت‌های با تخلخل بالا را در برمی‌گیرد. بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، اندازه بلورهای دولومیت (۴۰- ۶۰ µm) بوده و تخلخل بین‌بلوری مرتبط به‌هم وجود دارد (شکل ۷- ه). تخلخل بین ۵/۱۴ تا ۲۹/۹٪ بوده و میانگین ۱۸/۷۵٪ است. تراوایی ۰/۰۵ تا ۷۰۰ mD و میانگین ۴۲/۱۷ است. تخلخل و کیفیت مخزنی این گروه سنگی خوب ارزیابی می‌شود (شکل ۸- د).

گروه سنگی 3b- (RT3b) دولومیتی شدن در اندازه دولومیکرواسپاریت به‌صورت غیرتقلیدی و تخریب کننده فابریک سنگ، بافت دانه‌پشتیبان و تخلخل پایین: بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، اندازه بلورها در حد دولومیکرواسپاریت (۴۰- ۶۰ µm) بوده، تخلخل بین‌بلوری وجود نداشته یا همراه با سایر تخلخل‌ها با سیمان انیدریتی پر شده است (شکل ۷- و). میانگین تخلخل ۷٪ و میانگین تراوایی ۰/۶ mD بوده و کیفیت مخزنی ضعیف است (شکل ۸- ج).

گروه سنگی 4a- (RT4a) دولومیتی شدن در اندازه دولواسپاریت به‌صورت غیرتقلیدی و تخریب کننده فابریک سنگ، بافت دانه‌پشتیبان و تخلخل بالا: دولواسپاریت با تخلخل و تراوایی بالا. دولومیت متشکل از بلورهای درشت ۶۰-۳۰۰ میکرون تخلخل بین‌بلوری در این گروه سنگی به خوبی توسعه یافته و تخلخل‌ها با هم متصل هستند (شکل ۷- چ). در برخی نمونه‌ها تخلخل حفره‌ای نیز مشاهده می‌شود. تخلخل بین ۱۰/۱ تا ۲۹/۷۳٪ و میانگین ۱۶٪ بوده و تراوایی ۰/۰۱ تا ۵۸۰ mD و میانگین ۶۱/۸ است. تخلخل و کیفیت مخزنی این گروه بسیار خوب است (شکل ۸- د).

گروه سنگی 4b- (RT4b) دولومیتی شدن در اندازه دولواسپاریت به‌صورت غیرتقلیدی و تخریب کننده فابریک سنگ، بافت دانه‌پشتیبان و تخلخل پایین: بافت مشابه گروه سنگی 4a است ولی بلورها به هم متصل و فشرده هستند و تخلخل بین‌بلوری وجود نداشته یا در صورت وجود با سیمان انیدریتی پر شده است (شکل ۷- ح). تخلخل بین ۳/۸۴ تا ۱۳/۰۱٪ با میانگین ۸/۱۵٪ است. تراوایی ۰/۰۳ mD تا ۱۲۰ و میانگین ۴۷/۰۷ است. تخلخل و کیفیت مخزنی متوسط ارزیابی شده است (شکل ۸- ه).

گروه سنگی 5 -(RT5)- انیدریت: این گروه شامل انیدریت توده‌ای تا لایه‌بندی متوسط ندولار است (شکل ۷- ط). برخی قسمت‌ها با بخش‌های دولومیتی همراه است و گاها اائیدهای پراکنده در آن دیده می‌شود. انیدریت به‌صورت سخت و فشرده بوده و تخلخل تراوایی نشان نمی‌دهد و به‌عنوان لایه سدی برای اینترال‌های دولومیتی عمل می‌کند (شکل ۸- و).

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۰۵-۸۸

گروه سنگی 6 - (RT6): سنگ آهک چاکی شیل تا شیل آهکی خاکستری روشن در این گروه قرار می‌گیرد (شکل ۷- ی). این گروه سنگی به دلیل ویژگی تردی و شکنندگی بالا امکان تهیه نمونه پلاگ وجود نداشته و تنها یک نمونه پلاگ موجود بوده و تخلخل ۸/۳۴٪ و میانگین تراوایی ۵/۶۱ mD است اما براساس مشاهدات مغزه تخلخل چشمی در این گروه بسیار کم است.

زون‌بندی مخزن

تعیین زون‌های مخزنی از این جهت حائز اهمیت است که به کاهش ریسک فعالیت‌های حفاری کمک می‌کند و علاوه‌بر آن به زمین‌شناس در توسعه و برنامه‌ریزی بهتر میدان کمک می‌کند. برای زون‌بندی مخزن، از داده‌های رسوب‌شناسی (داده‌های مغزه، مقطع نازک)، داده‌های مغزه (آزمایش روتین) و داده‌های پتروفیزیکی استفاده شده است. هفت زون در سازند عرب شناسایی شده که به نام عرب ۱ تا عرب ۷ نام‌گذاری شده است (جدول ۲). هر زون از یک بخش مخزنی تشکیل شده که از نظر سنگ‌شناسی از دولومیت تشکیل شده و تخلخل و تراوایی خوبی نشان می‌دهد. روی آن یک لایه انیدریتی وجود داشته که واحد سدی آن زون را تشکیل می‌دهد. این زون‌ها در چاه‌های مختلف، در شکل ۹ با یکدیگر تطابق داده شده‌اند. در ادامه جزئیات و نتایج در این بخش مورد بحث قرار می‌گیرد.

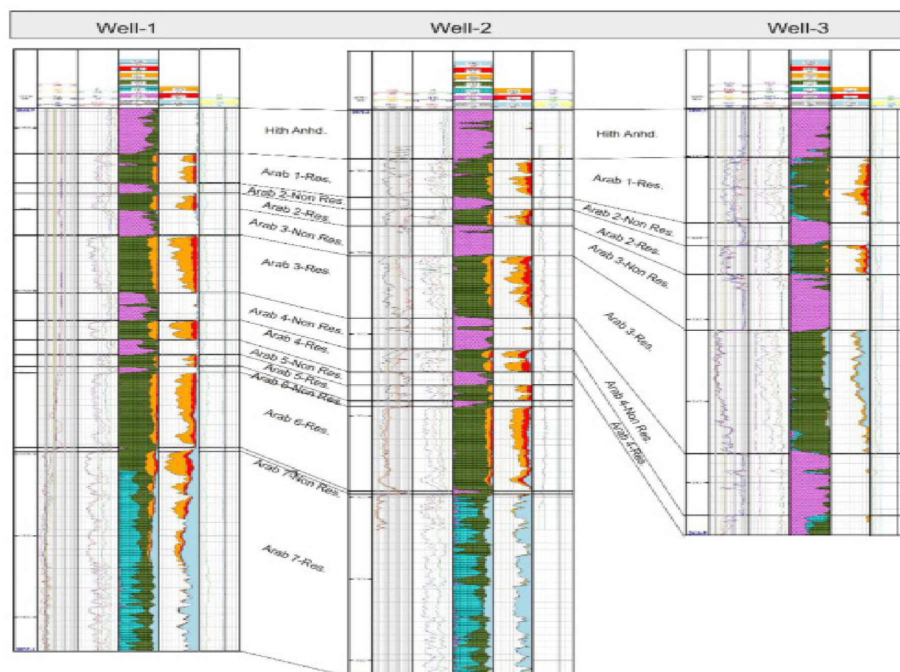
زون عرب ۱: انیدریت هیث- زون غیرمخزنی (سدی): ضخامت این زون بین ۷۹/۲ m تا ۱۴۲/۱ m در چاه‌های مختلف متغیر است. این زون از نظر سنگ‌شناسی از انیدریت تشکیل شده و فاقد تخلخل و تراوایی است. این زون به‌عنوان سدی برای واحد مخزنی زیرین عمل می‌کند. مشاهدات نشان می‌دهد که این زون به رنگ خاکستری متمایل به سفید تا سفید، عمدتاً سخت و متراکم بوده و در برخی نقاط دارای مواد آلی است. در زون ۱ این واحد معادل انیدریت هیث بوده اما جهت سهولت نام‌گذاری زون‌بندی به نام عرب ۱ نام‌گذاری شده است.

زون عرب ۱- زون مخزنی: ضخامت این زون بین ۹/۱ تا ۲۰/۱ m در چاه‌های مختلف متغیر است. این زون از دولومیت بودار، به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای سخت و متخلخل تشکیل شده است. دولومیت‌ها دارای آغشتگی به نفت و مواد آلی هستند. مشاهدات در ۳ چاه نشان می‌دهد که این زون عمدتاً از دولومادستون تشکیل شده است. اندازه بلورهای در برخی نمونه‌ها در حد دولواسپاریت بوده و عمدتا دارای تخلخل بین‌بلوری است با این حال، تخلخل قالبی، حفره‌ای و بزرگ شدن تخلخل‌ها بر اثر انحلال نیز قابل مشاهده است. میانگین تخلخل بین ۱۷-۸٪ است. شکستگی‌ها با انیدریت پر شده‌اند و ندول‌های انیدریت پراکنده نیز در آن دیده می‌شود. از مجموع مشاهدات می‌توان گفت که این زون، یک زون با کیفیت مخزنی متوسط تا بسیار خوب است.

زون عرب ۲- زون مخزنی: ضخامت این زون بین ۵ تا ۸/۹ m در چاه‌های مختلف متغیر است. سنگ‌شناسی اصلی در این زون دولومیت به رنگ قهوه‌ای تا خاکستری بوده که سخت و متخلخل، حاوی آغشتگی به نفت، و رگچه‌های انحلالی است. مشاهدات در ۳ چاه نشان می‌دهد که این زون عمدتاً از دولومیکریت، دولوسپاریت و دولومیکروسپاریت تشکیل شده است. گرینستون‌های اسکلتی اوییدی نیز در برخی مناطق این زون دیده می‌شود. این زون عمدتا حاوی تخلخل بین‌بلوری مرتبط به هم است. با این حال، تخلخل‌های قالبی، حفره ای، درون دانه ای و بین دانه ای نیز قابل مشاهده است. نوع غالب دیاژنز در این زون، تراکم به‌صورت تشکیل استیلولیت و رگچه‌های انحلالی و میکریتی شدن است. میانگین تخلخل بین ۹-۸٪ است. براساس پارامترهای فوق این زون نیز می‌تواند به‌عنوان یک زون مخزنی متوسط در نظر گرفته شود.

جدول ۲ زون‌های شناسایی شده در سازند عرب

نام زون	واحد	سنگ‌شناسی	رخساره غالب	فرآیندهای دیاژنزی موثر	نوع دولومیت و نوع تخلخل	میزان تخلخل (٪)	کیفیت مخزنی*
عرب ۱	انیدریت هیث	انیدریت	انیدریت	-	-	-	واحد سدی
	عرب ۱	دولومیت	دولومادستون تا دولومادستون فسیل‌دار	دولومیتی شدن انحلال	دولواسپاریت با تخلخل بین‌بلوری، قالبی و حفره‌ای	۱۷-۸	واحد مخزنی کیفیت متوسط تا بسیار خوب
عرب ۲	لایه انیدریت	انیدریت	انیدریت	-	-	-	واحد سدی
	عرب ۲	دولومیت	گرینستون‌های اسکلتی اائیدی	دولومیتی شدن	دولومیکریت، دولوسپاریت و دولومیکروسپاریت با تخلخل بین‌بلوری مرتبط به هم	۹-۸	واحد مخزنی کیفیت متوسط
عرب ۳	لایه انیدریت	انیدریت	انیدریت	-	-	-	واحد سدی
	عرب ۳	دولومیت	پکستون تا گرینستون اسکلتی اوییدی، گرینستون اائیدی اینتراکلاستی و وکستون اسکلتی	دولومیتی شدن	دولومیکریت، دولومیکریسپاریت و دولوسپاریت با تخلخل بین‌بلوری به هم مرتبط	۲۲-۱۴	واحد مخزنی با کیفیت خوب تا عالی
عرب ۴	لایه انیدریت	انیدریت	انیدریت	-	-	-	واحد سدی
	عرب ۴	دولومیت	گرینستون اائیدی تا گرینستون اائیدی اسکلتی دولومادستون‌های فسیل‌دار	دولومیتی شدن انحلال	دولومیکرواسپاریت تخلخل بین‌بلوری و قالبی	۲۵-۲	واحد مخزنی با کیفیت ضعیف تا عالی
عرب ۵	لایه انیدریت	انیدریت	انیدریت	-	-	-	واحد سدی
	عرب ۵	دولومیت		فشردگی دولومیتی شدن انحلال	دولوسپاریت، دولومیکروسپاریت و دولومیکریت تخلخل بین‌بلوری متصل و قالبی اائیدی	۱۶-۶	و واحد مخزنی با کیفیت متوسط تا بسیار خوب
عرب ۶	لایه انیدریت	انیدریت	انیدریت	-	-	-	واحد سدی
	عرب۶	دولومیت	بلورین	دولومیتی شدن برشی شدن و شکستگی	دولوسپاریت و دولومیکروسپاریت تخلخل بین‌بلوری و حفره‌ای به هم مرتبط	۱۹-۱۱	واحد مخزنی با کیفیت خوب تا بسیار خوب
عرب ۷	لایه انیدریت	انیدریت	انیدریت	-	-	-	واحد سدی
	عرب ۷	سنگ آهک چاکی با میان لایه‌های دولومیت	گرینستون اائیدی اسکلتی		در بخش‌های آهکی تخلخ بین‌دانه‌ای در بخش‌های دولومیتی دولوسپاریت عمدتاً با تخلخل بین‌بلوری	۲۳-۱۴	واحد مخزنی با کیفیت خوب تا عالی



شکل ۹ زون‌بندی مخزن سازند عرب و تطابق آن در چاه‌های مورد مطالعه

این زون با زون سدی عرب ۲ از جنس انیدریت و با ضخامت بین ۳ تا ۶/۹ m پوشیده شده است.

زون عرب ۳- زون مخزنی: ضخامت این زون بین ۱۷/۵ تا ۳۷/۷ m در چاه‌های مختلف متغیر است. سنگ‌شناسی اصلی در این زون دولومیت‌های قهوه‌ای تا خاکستری سخت، متراکم، متخلخل، آغشته به نفت، رگچه‌های انحلالی متعدد، خرد شده در نظر گرفته شده است. مشاهدات مغزه و مقاطع نازک نشان می‌دهد که این زون عمدتاً از پکستون تا گرینستون اسکلتی اوییدی، گرینستون اابیدی اینتراکلاستی و وکستون اسکلتی تشکیل شده است. انواع دولومیت شامل دولومیکریت، دولومیکریسپاریت و دولوسپاریت هستند. این زون عمدتا حاوی تخلخل بین‌بلوری به‌هم مرتبط است. با این حال، تخلخل‌های قالبی، بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای نیز قابل مشاهده است. میانگین تخلخل بین ۱۴ تا ۲۲٪ است. پارامترهای فوق نتیجه می‌دهد که این زون نیز کیفیت مخزنی خوب تا عالی نشان می‌دهد. این زون با زون سدی عرب ۳ از جنس انیدریت و با ضخامت بین ۸ تا m ۱/۷ پوشیده شده است.

زون عرب ۴- زون مخزنی: ضخامت این زون بین ۶ تا ۷ m متغیر است. سنگ‌شناسی اصلی دولومیت قهوه‌ای روشن در این زون، رگچه‌های انحلالی سخت، متخلخل، اینتراکلاست و ندول چرت است. براساس مشاهدات رسوب‌شناسی این زون عمدتاً از گرینستون اابیدی تا گرینستون اابیدی اسکلتی تشکیل شده است. دولومادستون‌های فسیل‌دار نیز در این زون مشاهده می‌شود. دولومیت از نوع دولومیکرواسپاریت است. این عمدتا حاوی تخلخل بین‌بلوری و قالبی مرتبط است. با این حال، تخلخل‌های حفره‌ای و بین‌دانه‌ای نیز قابل مشاهده است. میانگین تخلخل بین ۲۵-۲٪ است. این زون نیز می‌تواند به‌عنوان یک مخزن با کیفیت ضعیف تا عالی در نظر گرفته شود. این زون با زون سدی عرب ۴ از جنس انیدریت و با ضخامت بین ۸/۵ تا ۱۹ m پوشیده شده است.

زون عرب ۵ زون مخزنی: ضخامت این زون بین ۳/۵ تا ۵/۵ m متغیر است. سنگ‌شناسی اصلی در این زون دولومیت به رنگ قهوه‌ای روشن سخت و متخلخل، رگچه‌های انحلالی متعدد و استیلولیت است.

رخساره اصلی در این زون عمدتاً گرینستون اائیدی است. انواع دولومیت‌ها شامل دولوسپاریت، دولومیکروسپاریت و دولومیکریت بوده و عمدتا حاوی تخلخل بین‌بلوری متصل هستند. با این حال تخلخل قالبی اائیدی نیز می‌تواند مشاهده شود. رعایت پارامتر فوق به این نتیجه می‌رسد که می‌توان این زون را دارای کیفیت مخزن مناسبی نیز دانست. این زون با زون سدی عرب ۵ از جنس انیدریت و با ضخامت بین ۴ تا ۱۰/۵ m پوشیده شده است.

زون عرب ۶- زون مخزنی: ضخامت این زون بین ۲۲/۹ تا ۲۶ m متغیر است. این زون از دولومیت قهوه‌ای روشن همراه با ندول‌های انیدریت و ندول‌های چرتی تشکیل شده است. بافت سنگ متخلخل بوده و عمدتاً دارای تخلخل بین‌بلوری و حفره‌ای به هم مرتبط است. برشی شدن و شکستگی‌های عمودی و افقی در آن مشاهده می‌شود. انواع دولومیت مشاهده شده شامل دولوسپاریت و دولومیکروسپاریت هستند. میانگین تخلخل بین ۱۱-۱۹٪ است. براساس پارامترهای فوق به این نتیجه می‌رسد که این زون نیز می‌تواند به‌عنوان یک مخزن با کیفیت خوب تا بسیار خوب در نظر گرفته شود. این زون با زون سدی عرب ۶ از جنس انیدریت و با ضخامت بین ۱/۷ تا ۶ m پوشیده شده است.

زون عرب ۷- زون مخزنی: ضخامت این زون بین ۵۶/۳ تا ۶۱/۲۷ m متغیر است. سنگ‌شناسی اصلی در این زون سنگ آهک چاکی به رنگ سفید تا سفید مایل به خاکستری، متوسط تا درشت دانه، نرم، شکننده، متخلخل، همراه با میان لایه‌های دولومیت است. مشاهدات در ۳ چاه نشان می‌دهد که تخلخل در بخش‌های آهکی بین‌دانه‌ای و در بخش‌های دولومیتی عمدتاً بین‌بلوری است. رخساره اصلی در دولومیت‌ها دولوسپاریت است. میانگین تخلخل بین ۲۳-۱۴٪ است. این زون نیز می‌تواند به‌عنوان یک مخزن با کیفیت خوب تا عالی در نظر گرفته شود. این زون با زون سدی عرب ۷ از جنس انیدریت و با ضخامت بین ۰/۹ تا ۱/۲۵ m پوشیده شده است.

نتیجه‌گیری

مطالعه مغزه‌ها و مقاطع نازک موجود از ۳ حلقه چاه در میدان مورد مطالعه منجز به شناسایی ۸ رخساره در توالی مورد مطالعه شده است. مقایسه این رخساره‌ها با رخساره‌های استاندارد نشان می‌دهد که این رسوبات در کمربندهای سوپراتایدال، پهنه جزرومدی، لاگون و تپه‌های سدی زیرآبی نهشته شده‌اند. شواهدی چون تغییر تدریجی رخساره‌ها به یکدیگر، عدم وجود رخساره‌های سدی و ریف‌های بزرگ و عدم وجود رسوبات دوباره نهشته شده نشان می‌دهد که رسوبات این سازند در یک پلاتفرم کربناته از نوع رمپ ته‌نشست یافته‌اند. فرآیندهای دیاژنتیکی مختلفی بر رسوبات این سازند موثر بوده که از میان آنها دولومیتی شدن و انحلال باعث بهبود کیفیت مخزنی شده و سیمانی شدن (به‌ویژه سیمان انیدریتی) و فشردگی تاثیر منفی بر آن داشته است. از منظر عوامل کنترل‌کننده کیفیت مخزنی می‌توان نتیجه گرفت که سنگ‌شناسی، رخساره‌های رسوبی و دیاژنز از عوامل کنترل کننده کیفیت مخزنی هستند. به‌طوری‌که لایه‌های دولومیتی لایه مخزنی را تشکیل داده و لایه‌های انیدریتی پوشاننده آن، لایه‌های سدی را ایجاد کرده‌اند. تلفیق این اطلاعات با داده‌های تخلخل و تراوایی منجر به تفکیک و شناسایی ۷ زون مخزنی در این توالی شده است.که هر زون از یک لایه دولومیت با کیفیت مخزنی خوب تشکیل شده که توسط انیدریت به‌صورت لایه سدی پوشیده شده است. از میان رخساره‌های تشکیل دهنده نیز رخساره‌های دانه‌پشتیبان کیفیت مخزنی بهتری نسبت به سایر رخساره‌ها نشان می‌دهند.

مراجع

[1]. Ghazban F (2016) Petroleum geology of the Persian Gulf Tehran University, 1st edition, Tehran University and National Iranian Oil Company Publications, Tehran, 6, 1-707.
[2]. Powers, R.W. (1962). Arabian upper jurassic carbonate reservoir rocks, In: W.E. Ham (Eds.), Classification of Carbonate Rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1, 122-192.
[3]. Ahr WM (2011) Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks, John Wiley & Sons Publication, 1-277. ISBN: 978-0-470-16491-4.
[4]. Alsharhan AS Whittle GL (1995) Carbonate-evaporite sequences of the Late Jurassic southern and southwestern Arabian Gulf, Am Assoc Pet Geol Bull 79:1608–1630, doi.org/10.1306/7834DE2C-1721-11D7-8645000102C1865D.
[5]. Al-Saad, H. & Sadooni, F. N. (2001). A new depositional model and sequence stratigraphic interpretation for the Upper Jurassic Arab "D" reservoir in Qatar, Journal of Petroleum Geology, 24(3):243–264, doi.org/10.1111/j.1747-5457.2001.tb00674.x.
[6]. Cantrell, D. L., Swart, P. K., Handford, R. C., Kendall, Ch. G. & Westphal, H. (2001). Geology and production significance of dolomite Arab-D reservoir, Ghawar Field, Saudi Arabia, GeoArabia, 6(1):45–60, doi.org/10.2113/geoarabia060145.
[7]. Handford, C. R. Cantrell, D. L. & Keith, T. H. (2002). Regional facies relationships and sequence stratigraphy of super-giant reservoir (Arab-D Member) Saudi Arabia, In: Proceedings of the 22 Annual Gulf Coast Section SEPM Foundation, Bob F. Perkins Research Conference, 539–563, doi.org/10.5724/gcs.02.22.
[8]. Clark, D., Heaviside, J. & Habib, K. (2004). Reservoir properties of Arab carbonates, Al-Rayyan field, offshore Qatar, Geological Society, London, Special Publications, 235:193–232, doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.235.01.09.
[9]. Hollis, C., Lawrence, D. A., De Periere, M. D. & Al-Darmaki, F. (2017). Controls on porosity preservation within a Jurassic oolitic reservoir complex, UAE. Marine and Petroleum Geology, 88:888–906, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.09.015.
[10]. Marchionda, E., Deschamps, R., Cobianchi, M. Nader, F. H., Giuliu, A. D., Morad, D. J., Al-Darmaki, F. & Ceriani, A. (2018). Field-scale depositional evolution of the Upper Jurassic Arab Formation (onshore Abu Dhabi, UAE). Mar Pet Geol 89:350–369.
[11]. Al-Mojel, A. Razin, P. & Dera, G. (2020). High-resolution sedimentology and sequence stratigraphy of the Oxfordian-Kimmeridgian, Hanifa, Jubaila and Arab outcrops along Jabal Tuwaiq, Central Saudi Arabia, Journal of African Earth Sciences, 165, 103803, https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103803.
[۱۲]. اسعدی، ع.، شاکری، ع. ر.، کدخدایی، ع.، رحیم‌پور بناب، ح. و چهرازی، ع. (۱۳۹۵). تاثیر کانی‌زایی انیدریت بر کیفیت مخزنی دولومیت‌های سازند عرب؛ مطالعه موردی در یکی از میادین هیدروکربنی خلیج فارس، پژوهش نفت، ۲۶، ۴-۹۵، ۱۳-۲۴.
[۱۳]. صرفی، م. و اسعدی، ع. (۱۳۹۶). ویژگی‌های مخزنی توالی‌های دولومیتی سازند عرب، مطالعه موردی در یکی از میادین هیدروکربنی خلیج فارس، پژوهش نفت، ۲۷، ۶-۹۶، ۷۳-۸۷.
[14]. Sefidari, E. Amini, A. Kadkhodaie-Ilkhchi, A. Chehrazi, A. & Zamanzadeh, S. M. (2018). Depositional facies, diagenetic overprints and sequence stratigraphy of the upper Surmeh reservoir (Arab Formation) of offshore Iran, Journal of African Earth Sciences, 149:55–71, doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.07.025.
[15]. Sharifi-Yazdi, M., Rahimpour-Bonab, H., Tavakoli, V., Nazemi, M. & Kamali, M. R. (2019). Linking diagenetic history to depositional attributes in a high-frequency sequence stratigraphic framework: a case from upper Jurassic Arab formation in the central Persian Gulf, Journal of African Earth Sciences, 153:91–110, doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.02.006.
[16]. Sarfi, M., Asaadi, A., Imandoust, A., & Navidtalab, A. (2022). Depositional environments and sequence stratigraphy of the Arab Formation, Persian Gulf, Offshore Iran, Petroleum Science and Technology, DOI: 10.1080/10916466.2022.2048853.
[۱۷]. صالحی، م. ع.، شیرودی، س. ک.، موسوی حرمی، ر.، غفوری، م. و لشکری‌پور، غ. ر. (۱۳۹۴) تلفیق روش‌های مختلف در تعیین گونه‌های سنگی پتروفیزیکی برای بخش بالایی سازند سورمه در یکی از میادین نفتی بخش مرکزی خلیج فارس پژوهش نفت، دوره ۲۵، (۸۴): ۷۲-۸۷.
[18]. Daraei, M., Rahimpour-Bonab, H. & Fathi, N. (2014). Factors shaping reservoir architecture in the Jurassic Arab Carbonates: a case from the Persian Gulf, Journal of Petroleum Science and Engineering, 122:187–207, doi.org/10.1016/j.petrol.2014.07.010.

[۱۹]. همپائیان، ر.، رحیم‌پور بناب ح کمالی، م. ر. و موسوی حرمی، ر. (۱۳۹۴). عوامل موثر بر کیفیت مخزنی سازند سورمه فوقانی (عرب) در میادین بلال و سلمان – خلیج فارس، پژوهش نفت، ۲۵، (۸۳)، ۶۸-۸۱.
[20]. Assadi, A. Rahimpour-Bonab, H. & Kadkhodaie-Ilkhchi, R. (2018). Integrated rock typing of the grainstone facies in a sequence framework: a case from the Jurassic Arab Formation in the Persian Gulf, Acta Geologica Sinica, 92(4):1432–1450, doi.org/10.1111/1755-6724.13636.
[21]. Sharifi-Yazdi, M. Rahimpour-Bonab, H. & Nazemi, M. Diagenetic impacts on hydraulic flow unit properties:
insight from the Jurassic carbonate Upper Arab Formation in the Persian Gulf. J Petrol Explor Prod Technol 10, 1783–1802 (2020). https://doi.org/10.1007/s13202-020-00884-7.
[22]. Mehdi Sarfi Ali Asaadi Ali Imandoust & Amin Navidtalab (2022) Depositional environments and sequence stratigraphy of the Arab Formation, Persian Gulf, Offshore Iran, Petroleum Science and Technology, DOI: 10.1080/10916466.2022.2048853
[۲۳]. خسروتهرانی، خ. (۱۳۸۲). چینه‌شناسی رخدادهای دوران‌های زمین‌شناسی. مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران. ۴۶۳.
[۲۴]. علوی نایینی، م. (۱۳۸۸). چکیده از چینه‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور.
[25]. Dickson JAD (1965) A modified staining technique for carbonate in thin section: Nature, 205(4971): 587, doi: 10.1038/205587a0.
[26]. Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: W.E. Ham (Ed.), Classification of carbonate rocks. AAPG Memoir, 1, 108-121.
[27]. Embry, A. F. & Klovan, J. E. (1971). A late devonian reef tract on northeastern banks Island, Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 19(4): 730–781, doi.org/10.35767/gscpgbull.19.4.730.
[28]. Wilson JL (1975) Carbonate Facies in Geologic History, Springer-Verlag, New York, 319– 439.
[29]. Flügel E (2010) Microfacies of carbonate rocks, Springer – Verlag, New York, 967.
[30]. Warren, J. K. (1989). Evaporate Sedimentology: Importance in Hydrocarbon Accumulation: Englewood Cliffs. 2nd edition, N.J Prentice Hall, Inc. Springer, 1-285, ISBN: 0126363757.
[31]. Warren, J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations, Earth-Science Reviews 52 1–81, doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2.
[32]. Tucker, M. E. & Wright, V. P. (1990). Carbonate Sedimentology, Blackwell, Scientific Research Publishing, 482, dx.doi.org/10.1002/9781444314175.
[۳۳]. اسعدی، ع.، صرفی، م.، ایمن‌دوست، ع. و قانع عزآبادی، م. (۱۴۰۰). بررسی تاثیر رخساره‌های رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی بر کیفیت مخزنی سازند عرب در یکی از میادین نفتی جنوب خلیج فارس، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۷(۳): ۶۱-۹۰.
[34]. Sibley, D. F., & Gregg, J. M. (1987). Classification of dolomite rock texture, Journal of Sedimentary Petrology, 57(6): 967-975, doi.org/10.1306/212F8CBA-2B24-11D7-8648000102C1865D.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۱، صفحه ۱۱۹-۱۰۶

حذف فوتوکاتالیزوری رنگ‌دانه متیلن بلو به‌وسیله غشای نانو الیافی پلی استایرنی حاوی نانولوله‌های TiO_2

نیکو فرجی، مهدی محمودیان* و اصغر زمانی

گروه نانو فناوری، دانشکده شیمی، دانشگاه ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹

چکیده

در این مقاله کامپوزیت نانو الیاف پلی استایرن/نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم (PS/TiO_2 nanotubes) به‌روش الکتروریسی تهیه گردید. به‌منظور سنتز نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم از روش آندایزینگ استفاده شد. سپس تأثیر استفاده از درصدهای وزنی مختلف نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم بروی عملکرد غشاهای حاصل مورد بررسی قرار گرفت. نانو ذرات و نانو کامپوزیت‌های تهیه‌شده در این مقاله با استفاده از آنالیزهای مختلف موردبررسی قرار گرفتند که شامل طیف‌سنجی FT-IR و میکروسکوپی الکترونی روبشی FE-SEM به همراه طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس EDS است. رفتار حرارتی و ساختار بلوری غشاهای نانو کامپوزیتی تهیه‌شده به‌ترتیب با آنالیز TGA و پراش پرتوایکس XRD بررسی شد. سپس به‌منظور بررسی ساختارهای تهیه‌شده، آنالیزهایی از قبیل اندازه‌گیری تخلخل، زاویه تماس آب، تورم و شار آب‌بروی غشاها انجام گرفت. خاصیت فوتوکاتالیزوری نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم در تخریب متیلن آبی به دو روش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که حذف رنگ درروش ایستا (استفاده از غشاها به‌عنوان جاذب) و در زمان ۴۸ h به بهترین نحو انجام‌شده است. غشاهای نانو کامپوزیتی تهیه‌شده در فرآیند حذف فیلتراسیون رنگ نیز استفاده‌شده و بهترین نتایج با استفاده از غشای حاوی ۱ g/L نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم به‌دست آمد.

کلمات کلیدی: غشای نانو کامپوزیتی، الکتروریسی، نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم، تصفیه آب، فوتوکاتالیستی

مقدمه

آب شیرین یکی از نیازهای اساسی انسان است که برای مصارف آشامیدنی و کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرد. بیش از ۳/۲ سطح زمین با آب پوشیده شده است، بااین‌حال فقط ۱٪ از این مقدار در دسترس، شیرین و قابل‌استفاده است. با افزایش جمعیت و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از پیشرفت صنعت، نوآوری‌های فناوری و حمل‌ونقل، منابع آب شیرین روی سطح زمین با نرخ بیشتری رو به اتمام است.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی m.mahmoudian@urmia.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.5013.3234)

همچنیـن در نواحـی خشـک، کوهسـتانی و بیابانـی، بـارش کـم بـاران منجـر بـه کمبـود حـاد منابـع آب شـیرین می‌شـود. تصفیـهٔ آب شـامل روش‌هایـی بـرای زدودن آلودگی‌هـا و ذرات معلـق و محلـول در آب اسـت. در تصفیـهٔ آب صنعتـی روش‌هایـی مثـل فیلتراسـیون، تبـادل یونـی، الکترودیونیزاسـیون (EDI) و اسـمز معکـوس اسـتفاده می‌شـود [۱]. فن‌آوری‌هـای مبتنـی بـر غشـا در سـال‌های اخیـر محبوبیـت زیـادی پیـدا کرده‌انـد کـه ایـن امـر به‌دلیـل کارایـی جداسـازی بـالا، هزینه‌هـای نسـبتاً کـم و سـهولت کار یـک غشـاء اسـت. غشـا لایـه‌ای نیمه‌تـراوا اسـت کـه ماننـد یـک سـد عمـل می‌کنـد. بـه بیانـی دیگـر، غشـا فقـط بـه مـواد خاصـی اجـازه ورود می‌دهـد و مـواد زائـد را حـذف می‌کنـد. غشـاهای تهیه‌شـده از نانـو الیـاف الکتروریسـی شـده بـا برخـورداری از خـواص بی‌نظیـری همچـون نسـبت سـطح بـه حجـم بسـیار بـالا، درصـد تخلخـل مناسـب، انعطاف‌پذیـری و فعالیـت شـیمیایی در ابعـاد نانـو، یکی از گزینه‌هـای مناسـب در فرآینـد تصفیـه پسـاب به‌شـمار می‌آیـد [۲]. نانـو الیـاف، رشـته‌های بسـیار باریکـی هسـتند کـه دارای طـول بلنـدی نسـبت بـه قطـر خـود بـوده و کاربردهـای متفاوتـی دارنـد. روش الکتروریسـی بسـیار منعطـف بـوده و بـرای تولیـد نانـو الیـاف از طیـف وسـیعی از مـواد پلیمـری بـا محـدوده وسـیعی از قطـر الیـاف کاربـرد دارد [۳]. الکتروریسـی فرآینـدی اسـت کـه در آن از نیروهـای الکترواسـتاتیک بـرای تولیـد رشـته‌های نـازک از محلـول پلیمـری اسـتفاده می‌شـود. در ایـن روش از ولتـاژ بـالا بـرای تولیـد جریـان بـاردار در محلـول یـا مـذاب پلیمـر اسـتفاده می‌شـود [۴]. سـپس محلـول توسـط یـک پمـپ بـه داخـل لولـه موییـن فرسـتاده می‌شـود و در اثـر میـدان الکتریکـی حاصـل از منبـع تغذیـه ولتـاژ، مابیـن نـوک لولـه موییـن و جمع‌کننـده، ایـن محلـول به‌صـورت الیـاف بسـیار باریـک درآمـده و روی جمع‌کننـده جمـع‌آوری می‌شـود. در اثـر حرکـت سـیال، حـلال تبخیـر شـده و رشـته‌هایی بـا قطـر زیـر میکـرون روی جمع‌کننـده تولیـد می‌گـردد. الکتروریسـی یکـی از روش‌هـای آسـان و کاربـردی در تهیـه غشـای نانـو الیافـی می‌باشـد. تاکنـون بیـش از ۱۰۰ نـوع پلیمـر بـا موفقیـت الکتروریسـی شـده‌اند کـه می‌تـوان بـه پلـی آکریلونیتریـل، پلی‌اتیلـن اکسـید، پلی‌اتیلـن ترفتـالات، پلی‌اسـتایرن، پلـی کربنـات، پلـی سـولفات، پلـی وینیـل فنـل، سـلولز و ... اشـاره نمـود [۵]. دی‌اکسـید تیتانیـوم به‌دلیـل فعالیـت نـوری، قابلیـت تابـش نـوری، اسـتحکام مکانیکـی و هزینـه کـم یکـی از بهتریـن فوتوکاتالیسـت‌های نیمه‌هـادی موجـود اسـت. دی‌اکسـید تیتانیـوم به‌عنـوان یـک مـاده کانـی در سـنگ‌های ماگمایـی و همچنیـن در دیـواره پروسـکایت یافـت می‌شـود [۶]. نانولوله‌هـای TiO_2 به‌علـت خـواص منحصـر به‌فردشـان ازجملـه قابلیـت تغییـر یـون، پتانسـیل فوتوکاتالیسـتی، دارا بـودن سـطح وسـیع و خـواص الکتریکـی قابل‌توجـه، اهمیـت زیـادی کسـب کرده‌انـد، امـا ظرفیـت ویـژهٔ آن به‌علـت وجـود فازهـای تـرد پاییـن اسـت و به‌علـت فاصلـهٔ انـرژی وسـیع آن رسـانایی ضعیفـی دارد [۷]. یکـی از روش‌هـای سـنتز نانولولـه TiO_2 روش اکسیداسـیون آندی می‌باشـد. از روش‌هـای حرارتـی و الکتروشـیمیایی بـرای اصـلاح سـاختار آن‌هـا استفاده‌شـده اسـت [۸]. تولیـد نانـو تیوب‌هـای خـود سـازمان‌یافته TiO_2 به‌وسـیله آندایزینـگ تیتانیـم در محلول‌هـای حـاوی فلوئوریـد، روش نسـبتاً جدیـدی اسـت کـه قابلیـت بسـیار زیـادی در تولیـد دسـته‌های نانـو تیـوب TiO_2 بـا نظـم بسـیار زیـاد و انـدازه کنترل‌شـده دارد.

عملکـرد ایـن نانولوله‌هـای دی‌اکسـید تیتانیـوم در کارایی غشـاها در مطالعـات قبلـی مـورد بررسـی قرارگرفتـه اسـت [۹]. منصـور پنـاه و همکارانـش [۱۰] شـرح دادنـد کـه کاهـش شـدید شـار آب خالـص در غشـای PES/PI اصلاح‌شـده بـا دی اتانـول آمیـن (DEA)، حـاوی نانـو ذرات دی‌اکسـید تیتانیـوم به‌علـت سـاختار سـطحی متراکـم تشکیل‌شـده روی سـطح غشـا اسـت. افزایـش میـزان دی اتانـول آمیـن (DEA) می‌توانـد شـار غشـا و رد نمـک را انـدکی بهبـود بخشـد. بااین‌وجـود، آن‌هـا دریافتنـد کـه غلظـت نانـو ذرات دی‌اکسـید تیتانیـوم تأثیـری برروی PES/PI اصلاح‌شـده بـا دی اتانـول آمیـن

(DEA)، شار آب خالص و پس‌زنی نمک ندارد. کیم و همکارانش [۱۱] گزارش کردند که غشای کامپوزیتی فیلم نازک پلی ایمید آروماتیک پوشش یافته با نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بعد از ۳ روز تحت تابش نور فرابنفش در مواجه با سلول‌های میکروبی در یک سیستم اسمز معکوس پایداری شار خوبی دارد. در مقابل، شار غشای خالص در ابتدا بالاتر بود اما پس‌ازآن به‌سرعت افت کرد. یو و همکارانش [۱۲] دریافتند که عملکرد بالای غشای پلیمری پوشش یافته با TiO_2 در بازیابی شار بعد از فیلتراسیون آلبومین سرم گاوی ۱٪ (BSA) تحت تابش نور تأثیر دارد. یو و همکارانش [۱۲] یک غشای PVDF تجاری را با پلاسما فرآوری کردند و سپس پلیمریزاسیون پیوندی را از طریق غوطه‌وری آن در محلول اسید اکریلیک آبی نیتروژن دهی شده در غلظت‌های مختلف انجام دادند تا آب‌دوستی را افزایش دهند. فرآوری پلاسمایی برای تحریک سطح غشا و تولید رادیکال‌ها و پیشبرد واکنش‌های پیوندی انجام شد. سپس TiO_2 به‌صورت موفقیت‌آمیز بر روی سطح غشای عامل دار شده نشانده شد.

هیون کو و همکارانش [۱۳]، موفق به ساخت کامپوزیتی فتوآندی از نانو ذرات/ نانو میله دی‌اکسید تیتانیوم به‌منظور بهبود قدرت راندمان تبدیل انرژی سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای شدند. نانو میله دی‌اکسید تیتانیوم با استفاده از فرآیند الکتروریسی نانو الیاف دی‌اکسید تیتانیوم تولیدشده و برای به‌دست آوردن توزیع اندازه یکنواخت نانو میله تحت‌فشار مکانیکی قرار داده شد. در مقایسه با فتوآند نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم قبلی (اولیه)، راندمان تبدیل دستگاه کامپوزیت نانو میله دی‌اکسید تیتانیوم به ۳۱٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که ساختار نانو کامپوزیت می‌تواند هم انتقال سریع الکترون از نانو میله را افزایش دهد و هم ناحیه سطحی نانو ذرات را افزایش دهد. هانگ یان چن و همکارانش [۱۴] نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم با تخلخل بالا برای سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای مؤثر ایجاد کردند. نانو میله دی‌اکسید تیتانیوم آناتاز، با تخلخل بالا با استفاده از الکتروریسی میکرو امولسیون ساده به‌عنوان مواد فتوآند در سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای با راندمان بالا تولید می‌شود. ساختارمتخلخل مخصوص چند مقیاسی با به‌کارگیری قطرات روغن پارافین میکرو امولسیون به‌عنوان قالب نازک با هزینه کم تشکیل می‌شود که نه‌تنها سایت‌های جذب مولکول رنگ را تشکیل می‌دهد، بلکه نفوذ الکترولیت را نیز تسهیل می‌کند. نتایج نشان داد که اگرچه مقدار کمی رنگ بروی فیلم نانو میله دی‌اکسید تیتانیوم متخلخل قرار دارند، آن‌ها توانایی بیشتری برای پراکنده کردن نور، انتشار الکترولیت سریع و طولانی الکترون و طول عمر بیشتری نسبت به نانو ذرات p25 (نانو ذرات تیتانیوم شامل فاز آناتاز و روتایل است) دارند. راندمان تبدیل ۶/۱۷٪ برای نانو میله متخلخل دی‌اکسید تیتانیوم مبتنی بر سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای به‌دست می‌آید. علاوه بر این، این مقدار وقتی نانو میله متخلخل به‌کاررفته شده به‌عنوان لایه پراکندگی نور، از دولایه فتوآند ساخته‌شده باشد، می‌تواند به ۸/۵۳٪ توسعه پیدا کند که در این صورت عملکرد فتوولتائیک عالی از نانو میله‌های متخلخل را نشان می‌دهد. یونگ هی هونگ و همکارانش [۱۵] اثر نانو میله دی‌اکسید تیتانیوم فاز روتایل بر فتوالکترود سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای را بررسی کردند. علیرغم بررسی‌های انجام‌شده در مورد کارایی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان افزودنی در غشاها، تاکنون نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم در غشاها مورداستفاده قرار نگرفته است. برای تهیه غشاهای نانو الیافی از پلیمر پلی استایرن در فرآیند الکتروریسی استفاده شد و بعد از به‌دست آوردن فیلم متخلخل متشکل از نانو الیاف به‌عنوان غشا، نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم روی آن‌ها تثبیت گردید. نانولوله‌های سنتز شده و غشاها ازلحاظ ساختاری و عملکردی مورد ارزیابی قرار گرفتند و فعالیت فوتوکاتالیزوری مجموعه

نانــو کامپوزیتــی در تخریــب و حــذف رنگ‌دانــه متیلــن بلــو مطالعــه شــد. در ایــن مطالعــه نانولوله‌هــای دی‌اکســید تیتانیــوم ســنتز شــد و به‌صــورت افزودنــی در غشــاهای نانــو الیافــی اســتفاده گردیــد.

بخش تجربی

مواد لازم

پلی‌اســتایرن تهیه‌شــده از شــرکت پترومــل، دی متیــل فرمامیــد (DMF)، اتیلــن گلیکــول و آمونیــوم فلورایــد تهیه‌شــده از شــرکت مــرک، هیدروفلئوریــک اســید و نیتریــک اســید تهیه‌شــده از شــرکت ســیگما آلدریــچ و آب مقطــر استفاده‌شــده اســت.

روش کار

سنتز نانولوله‌های TiO_2 به‌روش آندایزینگ

به‌منظــور ســنتز نانولوله‌هــای TiO_2 بــه‌روش آندایزینــگ ابتــدا بایــد محلــول الکترولیــت موردنظــر تهیه‌شــده و فلــزات مورداســتفاده در آنــد و کاتــد کــه به‌ترتیــب Ti و Pt هســتند جهــت قرارگیــری در مــدار آماده‌ســازی شــوند.

محلول الکترولیت موردنیاز آندایزینگ

به‌منظــور انجــام آندایزینــگ بایــد محلــول الکترولیتــی ســاخته شــود کــه در ولتــاژ موردنظــر رســانایی خوبــی از خــود نشــان دهــد، بــرای ایــن منظــور g ۰/۵ پــودر آمونیــوم فلوئوریــد و mL ۲/۵ آب مقطــر در یــک بالــن حجمــی mL ۱۰۰ ریختــه شــد و بــا اتیلــن گلیکــول بــه حجــم رســانده شــد.

آماده‌سازی فلزات Ti و Pt

در قــدم اول، ورقه‌هــای فلــز Ti در ابعــاد تقریبــی cm^2 ۱۰×۵ بــرش داده و بــا ســنباده زبــر بــا شــماره P ۱۰۰ ســطح فلــز به‌خوبــی صیقــل داده شــد تــا ســطح عــاری از هرگونــه آلودگــی گــردد و در قــدم بعــد بــا ســنباده نــرم بــه شــماره P ۴۲۰ دوبــاره ســطح جــلا داده شــد تــا صــاف و روشــن گــردد. ســپس فلــز بــا آب مقطر شستشــو داده شــد. بــرای پاک‌ســازی کامــل فلــز Ti و ورق Pt از هرگونــه آلودگی‌هــای ســطحی و ناخالصــی به‌ترتیــب ایــن فلــزات در محلــول شستشــو قــرار داده شــد و پــس از چنــد دقیقــه غوطــه‌ور مانــدن فلــز خــارج گردیــد و بــا آب مقطــر آب‌کشــی شــد. پــس از آماده‌ســازی فلــزات و محلــول الکترولیــت موردنظــر، بــا اســتفاده از یــک منبــع تغذیــه مــداری به‌صــورت زیــر بســته می‌شــود: فلــز Ti به‌عنــوان الکتــرود کار بــه قطــب مثبــت و فلــز Pt به‌عنــوان الکتــرود کمکــی بــه قطــب منفــی متصــل شــده و اختلاف‌پتانســیل دو ســر مــدار بــه V ۴۰ رســانده شــد. هم‌زمــان بــا اعمــال ولتــاژ محلــول الکترولیــت در دمــای اتــاق بــرروی همــزن مغناطیســی قــرار داده شــد تــا در طــول فرآینــد آندایزینــگ از انباشــته شــدن ناهمگــون نانولوله‌هــا خــودداری شــود. فرآینــد رشــد و ســنتز نانولوله‌هــا در مــدت اعمــال ولتــاژ بــه مقــدار h ۳ صــورت می‌گیــرد. پــس از اتمــام ایــن مرحلــه مــدار قطــع شــده و فلــز بــا آب مقطــر آب‌کشــی می‌شــود. پــس از انجــام ایــن مرحلــه، یــک لایــه اکســیدی روی ســطح فلــز تشــکیل شــده و به‌مــدت یــک شــبانه‌روز در دمــای اتــاق قــرار داده شــد تــا بــا برخــورد بــا مولکول‌هــای هــوا خشــک گــردد. ســپس نانولوله‌هــای ســطح فلــزات خــراش داده شــد و جــدا گردیــد. ایــن فرآینــد تــا دســتیابی بــه مقــدار کافــی از نانولوله‌هــای TiO_2 تکــرار شــد.

فرآیند تولید نانو الیاف

مقــدار g ۲ پلــی اســتایرن در mL ۸ حــلال دی متیــل فرمامیــد (DMF) بــا اســتفاده از یــک همــزن به‌مــدت h ۲۴ حــل گردیــد. ایــن محلــول در یــک ســرنگ mL ۵ ریختــه شــد و الکتروریســی تحــت پتانســیل الکتریکی kV ۲۴ انجــام شــد. فاصلــه الکتــرود از صفحــه جمع‌کننــده cm ۱۵ و ســرعت تزریــق حــدود mL ۰/۵ در h بــود. از یــک فویــل آلومینیومــی به‌عنــوان جمع‌کننــده اســتفاده شــد و نانــو الیــاف جمع‌آوری‌شــده روی فویــل به‌مــدت h ۲ الکتروریســی شــد. بــا اســتفاده از صافــی (قیــف بوخنــر) مخلوط‌هایــی بــا درصدهــای مختلــف نانــو ذرات دی‌اکســید تیتانیــوم تهیــه و از غشــاها عبــور داده شــد. فرمولاســیون غشــاءهای تهیه‌شــده در جــدول ۱ آورده شــده اســت.

جدول ۱ انواع غشاهای پلی استایرن تهیه‌شده با درصدهای مختلف دی‌اکسید تیتانیوم

شماره غشا	وزن کلی مخلوط (برحسب g)	مقدار حلال DMF (برحسب g)	مقدار پلیمر PPS (برحسب g)	مقدار وزنی پرکننده (TiO_2) ٪
۱	۱۰	۸	۲	۰
۲	۱۰	۸	۲	۰/۰۲
۳	۱۰	۸	۲	۰/۰۵
۴	۱۰	۸	۲	۰/۱

شناسایی

آزمون‌هایی که در این مقاله در راستای شناسایی ساختارهای تهیه‌شده انجام شد، شامل TGA، XRD، EDX، FT-IR، SEM -FE می‌باشد. آنالیز SEM-FE با دستگاه مارک MIRA3 FE-GSEM ساخت کمپانی TESCAN کشور جمهوری چک صورت گرفت. رسانا بودن سطح نمونه، شرط لازم برای بررسی نمونه در آنالیز SEM -FE است. آنالیز EDX به‌کمک دستگاه Bruker ساخت کشور آلمان برای آنالیز عنصری مورداستفاده قرار گرفت. آنالیز FT-IR با دستگاه Nexus-670 ساخت کمپانی Thermo Nicolet آمریکایی برای پایش گروه‌های عاملی نمونه قبل و بعد از عامل دار شدن با نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم مورداستفاده قرار گرفت. این روش طیف‌سنجی براساس جذب امواج فروسرخ توسط نمونه استوار است و روش بسیار مفید برای بررسی گروه‌های عاملی و تأیید عامل دار شدن ساختارهای تهیه‌شده و بستر پلیمری است. برای انجام آنالیز XRD از دستگاه Panalytical از کشور هلند با مدل Xpert pro برای مطالعه ساختار مواد بلوری مورداستفاده قرار گرفت. در این مقاله برای بررسی ساختار نمونه ازنقطه‌نظر حرارتی از آنالیز TGA استفاده شد. در این روش حرارت دهی نمونه تا محدوده‌ای انجام می‌شود و تجزیه حرارتی نمونه براساس اتلافات جرم آن به‌صورت نموداری رسم می‌شود که برای مطالعه ساختار ذرات بسیار مفید است.

اندازه‌گیری زاویه تماس

برای اندازه‌گیری زاویه تماس آب و بررسی میزان آب‌دوستی سطح غشاء پرشده با نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم ابتدا با یک سرنگ روی هرکدام از غشاهای تهیه‌شده، چند قطره آب قرار داده شد. سپس توسط دوربین در مقطع عرضی از آن قطرات و سطح غشاء عکس گرفته شد و با استفاده از نرم‌افزار image J زاویه سطح تماس آب با هرکدام از غشاها تعیین شد.

آزمون تورم

تست تورم در این تحقیق با برش غشاها به ابعاد ۱ در ۱ cm انجام شد و قبل و بعد از قرار گیری آن‌ها در آب به‌مدت ۲۴ h توزین شدند و میزان افزایش وزن به‌عنوان میزان تورم غشاها در اثر محیط آبی بیان گردیدند (رابطه ۱).

$$Q = \frac{W_S - W_D}{W_D} \times 100 \qquad (۱)$$

در این رابطه، W_s وزن‌تر و W_D وزن خشک می‌باشد. درصد تورم به وزن‌تر و تخلخل غشا بسیار وابسته است.

اندازه‌گیری تخلخل

اندازه‌گیری تخلخل در این تحقیق به‌عنوان حجم حفرات تقسیم‌بر حجم کل غشاء تعریف می‌شود و به‌کمک رابطه ۲ قابل محاسبه است.

$$porosity\ (\%) = \frac{W_{tw} - \frac{W_{td}}{\rho_k}}{W_{tw} - \frac{W_{td}}{\rho_k} + \frac{W_{td}}{\rho_p}} \times 100 \qquad (۲)$$

در این رابطه، W_{tw} وزن غشای تر بوده و W_{td} وزن غشای خشک است. در ضمن، ρ_k چگالی آب و ρ_p چگالی پلیمر است.

هر نمونه از غشاها توزین شد و در ظرف آب فروبرده شد و به‌مدت ۲۴ h نگهداری گردید. این آزمون سه مرتبه انجام شد و سپس تخلخل به‌صورت میانگین محاسبه گردید.

بررسی خاصیت فوتوکاتالیزوری غشاهای نانو کامپوزیت

در این مطالعه از دو روش برای بررسی حذف رنگ متیلن آبی از آب استفاده شد. روش اول بر اساس جذب با بررسی رفتار فوتوکاتالیزوری غشاها در محلول و روش دوم با توجه به خاصیت فوتوکاتالیزوری غشا در حین فیلتراسیون انجام شد. در روش اول، غشای تهیه‌شده در این تحقیق با توجه به دارا بودن نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم که یک ماده نور فعال با خواص فوتوکاتالیزوری است، تحت فرآیند تخریب فوتوکاتالیزوری رنگ متیلن آبی مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب، به‌منظور تجزیه فوتوکاتالیزوری متیلن آبی در حضور غشاهای تهیه‌شده، محلول آبی این رنگ با غلظت ۱۰ ppm تهیه و به‌مدت ۱۰ h در یک ظرف به‌دور از نور نگهداری شد. بعد از مرحله تاریکی یک مرحله فتوکاتالیز با محلول رنگ بدون حضور فتوکاتالیست تحت تابش نور مرئی انجام گرفت، تا برهم‌کنش رنگ با نورمرئی مشخص شود. غشاهای تهیه‌شده با اندازه‌های معین برش داده شدند و در حجم معینی در بشرهای حاوی محلول رنگ غوطه‌ور شدند. سپس، ظروف موردنظر در معرض یک منبع نور فرابنفش قرار گرفت. بعد از انجام این آزمایش به‌مدت ۲۴ h تغییر قابل سنجشی در غلظت رنگ حاصل نشد. در روش دوم، غشا به‌اندازه محفظه سل نانو فیلتراسیون برش داده و در محفظه قرار گرفت. سپس محلول متیلن آبی با غلظت ۱۰ ppm از سل فیلتراسیون عبور داده شد. از محلول آبی ورودی و خروجی سل در طول‌موج ۶۶۵ nm جذب گرفته شد تا میزان حذف رنگ محاسبه گردد. لازم به ذکر است که در این روش از دستگاه اسپکتروفوتومتر فرابنفش مرئی، برای پایش و بررسی حذف رنگ استفاده شد.

بحث و بررسی

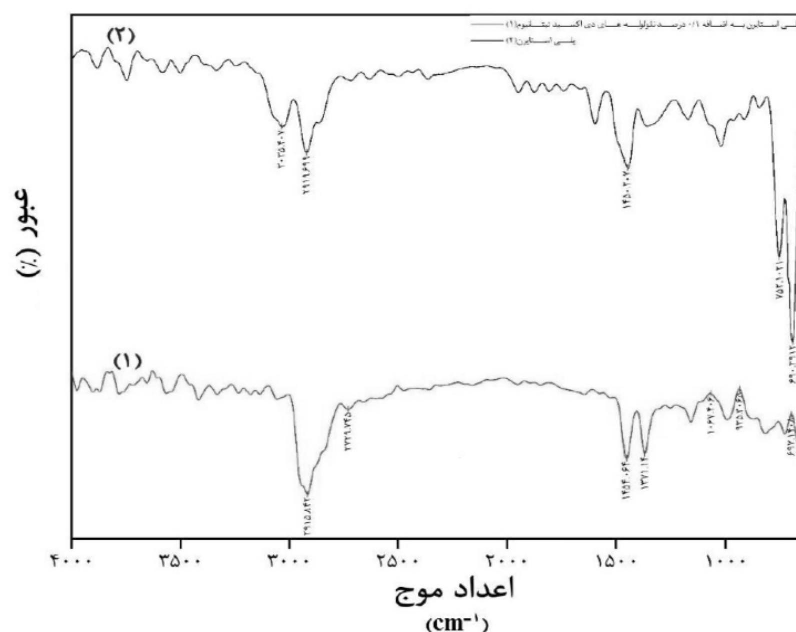
در این قسمت اقدام به انجام آزمون‌هایی گردید که ساختار شیمیایی و ریخت‌شناسی نانولوله‌ها و غشاهای حاوی این نانو ساختارها تعیین و تائید گردد. این آنالیزها شامل FTIR، XRD، FE-SEM، EDX و TGA می‌باشد.

طیف‌سنجی فروسرخ

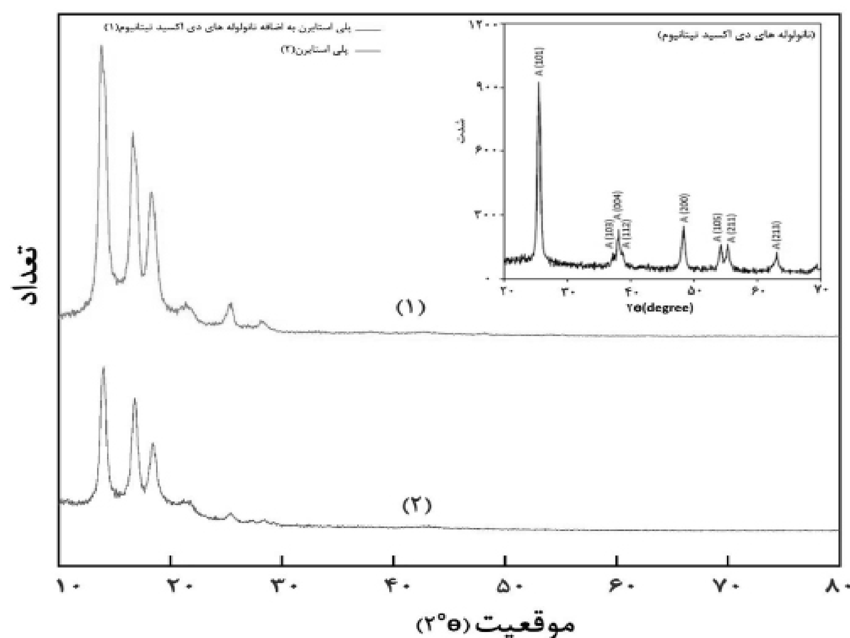
شکل ۱ نتایج طیف‌سنجی فروسرخ را برای پلی استایرن و نانو کامپوزیت نهایی نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار پلی استایرن (نمودار ۱) دیده می‌شود، پیک‌های ظاهرشده در حوالی cm^{-1} ۲۹۱۹ و ۳۰۳۵ cm^{-1} به‌ترتیب مربوط به ارتعاشات کشش پیوندهای C-H با هیبریداسیون 2sp و 3sp است که ناشی از پیوندهای ساده و دوگانه ساختار پلی استایرن است. همان‌طور که در اعداد موج پایین‌تر نیز دیده می‌شود، همین کشش‌ها دارای پیک‌های متناظر خمشی در ۱۴۵۰ cm^{-1} و ۱۳۷۵ cm^{-1} است که به‌ترتیب تأیید دیگری بر پیوندهای C-H با هیبریداسیون های مذکور ساختار پلی استایرن است. دلیل بعدی بر تأیید ساختار آروماتیک ظهور پیک مشخصه در حوالی ۱۸۰۰ cm^{-1} است که مختص حلقه آروماتیک است. با توجه به نمودار غشای نانو کامپوزیتی پلی استایرن حاوی نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم (نمودار۲) در شکل ۱ ظهور پیک در حوالی ۶۹۰ cm^{-1} می‌تواند مربوط به برقراری برهمکنش شیمیایی میان پلی استایرن و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم باشد. همین موضوع تا حدی عامل دار شدن و افزوده شدن این نانو ذرات را به ماتریس پلیمری تأیید می‌نماید. از طرف دیگر، پیک نسبتاً ضعیف در حوالی ۶۹۰ cm^{-1} مربوط به کشش Ti-O می‌باشد و دلیل قاطع برافزوده شدن نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به ساختار پلی استایرن است.

مطالعات بلورنگاری و پراش پرتوایکس

نمودار ارائه‌شده در شکل ۲ مربوط به پراش پرتوایکس نمونه بدون دی‌اکسید تیتانیوم و نانو کامپوزیت حاوی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم می با شد.



شکل ۱ نمودار طیف‌سنجی پلی استایرن و نمونه حاوی دی‌اکسید تیتانیوم

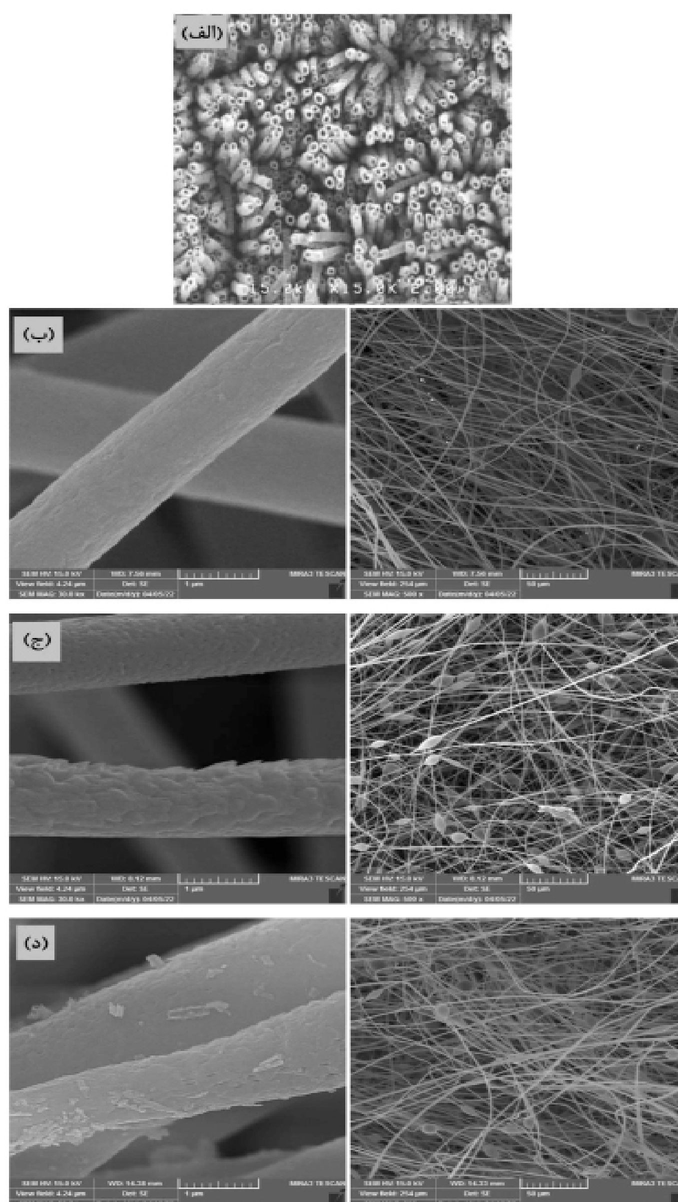


شـــکل ۲ نمـودار پـراش پرتوایکـس نانولوله‌هـای دی‌اکسـید تیتانیـوم و پلـی اسـتایرن و نانـو کامپوزیـت پلـی اسـتایرن حـاوی نانـو ذرات دی‌اکسـید تیتانیـوم

کـه به‌دلیـل نظـم ضمنـی موجـود در سـاختار پلـی اسـتایرن و نانـو کامپوزیـت تهیه‌شـده تغییـر فاحشـی در نمـودار پـراش دیـده نمی‌شـود. بـا در نظـر گرفتـن ایـن مباحـث، پیک‌هـای مربـوط بـه صفحـات (۱۰۱)، (۰۰۴)، (۲۰۰)، در موقعیت‌هـای متناظـر خـود در ۲۵، ۳۷ و °۴۸ به‌سـختی قابل‌مشـاهده هسـتند کـه بـا صفحـات بلـوری دی‌اکسـید تیتانیـوم دارای انطبـاق و همخوانـی هسـتند. بـا توجـه بـه الگـوی مشـاهده شـده XRD و همچنیـن منابـع موجـود تیتانیـوم سـنتز شـده از نـوع آناتـاز اسـت.

بررسی تصاویر میکروسکوپی روبشی الکترونی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانولوله‌های سنتز شده و غشاهای الیافی در شکل ۳ آورده شده است. در تصاویر مربوط به نانولوله‌ها که در شکل ۳- الف) دیده می‌شود، فرم نانولوله‌های توخالی به‌وضوح قابل‌مشاهده است که در سطح بستر تیتانیومی ثبت‌شده است. طول نانو الیاف در این شکل قابل‌تشخیص نیست، ولی قطر نانولوله‌ها در حدود ۲۵۰ nm است. در شکل ۳- ب) تصاویر الیاف مربوط به غشاهای پلی استایرن خالی دیده می‌شود. در این شکل الیاف با قطر حدودی ۱ µm با یکنواختی مناسب قابل‌مشاهده است. در سطح این الیاف هیچ‌گونه نانوذره‌ای دیده نمی‌شود. تصاویر الیاف پلی استایرن دارای ۰/۰۲ و ۰/۱٪ از نانولوله‌ها نیز در شکل ۳- ج) و د) آورده شده است. مشخص است که در درصد پایین، این نانولوله‌ها قابل‌تشخیص نیست، ولی در غشای با درصد بالای نانولوله این افزودنی به‌وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پلی استایرن با بزرگ‌نمایی ۱ و ۵۰ میکرومتر الف) نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم، ب) نانو الیاف پلی استایرن ج) نانو کامپوزیت حاوی دی‌اکسید تیتانیوم با درصد ۰/۰۲ و د) نانو کامپوزیت PS/TiO_2 با ۰/۱ دی‌اکسید تیتانیوم

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۱، صفحه ۱۱۹-۱۰۶

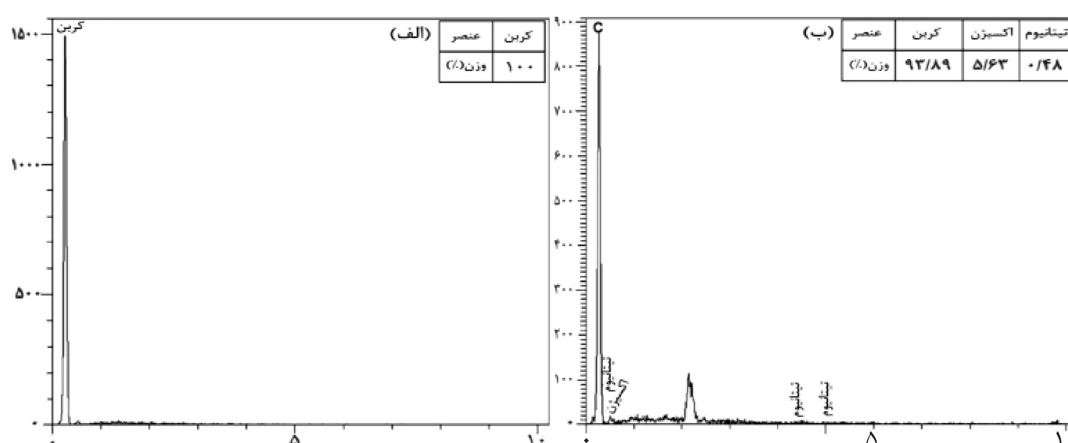
و در سطح الیاف به‌خوبی پخش شده‌اند.

بررسی نمودارهای پراش انرژی پرتوایکس

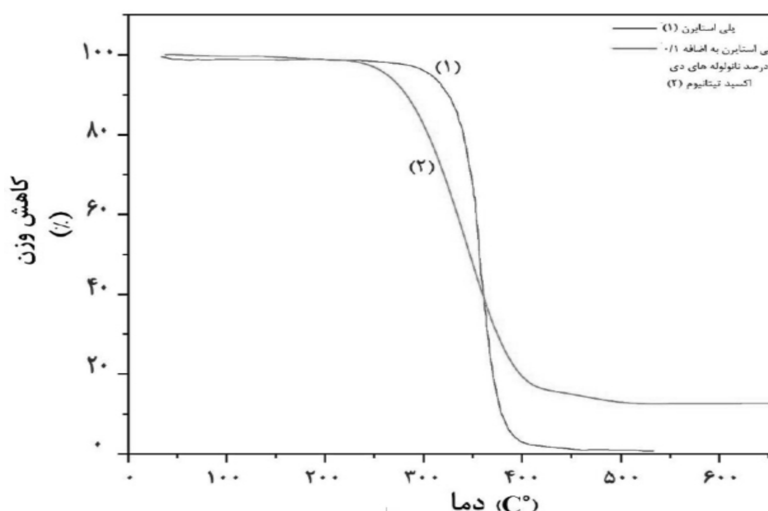
نمودارهای موجود در شکل ۴ نشان‌دهنده عناصر موجود در ماتریس پلی استایرن فاقد نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم و پلی استایرن اصلاح‌شده با نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم می‌باشد. همان‌طور که در طیف EDS نانو کامپوزیت حاوی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم دیده می‌شود، عناصری از قبیل تیتانیوم، اکسیژن و کربن در ساختار وجود دارند که تأییدکننده تهیه موفقیت‌آمیز نانو کامپوزیت پلی استایرن حاوی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم است.

تحلیل وزن سنجی حرارتی

شکل ۵ نشان‌دهنده ترموگرام TGA برای پلیمر عاری از نانو ذرات (نمودار ۱) و نانو کامپوزیت PS/TiO_2 (نمودار ۲) است. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، پلی استایرن افت وزنی را در دمای ۳۵۰ °C نشان داده و تا ۵۰۰ °C تقریباً تمام وزن خود را ازدست‌داده، که به‌صورت ترکیبات فرار خارج می‌شود. تنها تفاوت ملاحظه شده در نمودار نانو کامپوزیت در اثر افزوده شدن نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، دمای تجزیه کاهش‌یافته و خاکستر باقی‌مانده نهایی به‌دلیل وجود نانولوله‌ها بالاتر از پلی استایرن عاری از دی‌اکسید تیتانیوم می‌باشد. این امر به نحوی می‌تواند دلیلی برافزوده شدن دی‌اکسید تیتانیوم در ساختار پلی استایرن باشد.



شکل ۴ الف) نمودار پراش انرژی پرتوایکس پلی استایرن ب) نمودار پراش انرژی پرتوایکس نانو کامپوزیت PS/TiO_2



شکل ۵ تحلیل وزن سنجی حرارتی برای پلی استایرن و PS/TiO_2

آزمون تورم غشا

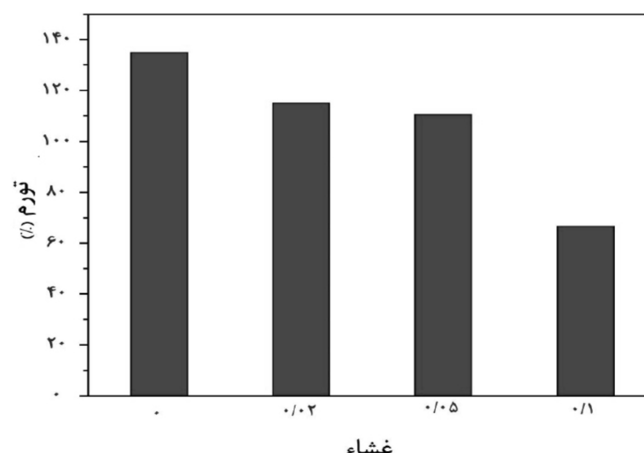
شکل ۶ نشان‌دهنده نتایج تورم در غشاهای حاوی مقادیر مختلف نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم است. همان‌طور که در آزمون زاویه تماس آب نیز بیان شد، بالا رفتن میزان نانو ذرات در ماتریس غشاء با کاهش زاویه تماس و بالا رفتن آب‌دوستی آن رابطه مستقیم دارد. در همین راستا، هرچه یک غشاء آب‌دوست باشد، درصد تورم آن در حضور آب نیز بالاتر می‌رود. این حقیقت در نمودار شکل ۶ نشان داده‌شده است.

مطالعه تخلخل غشاهای نانو کامپوزیتی

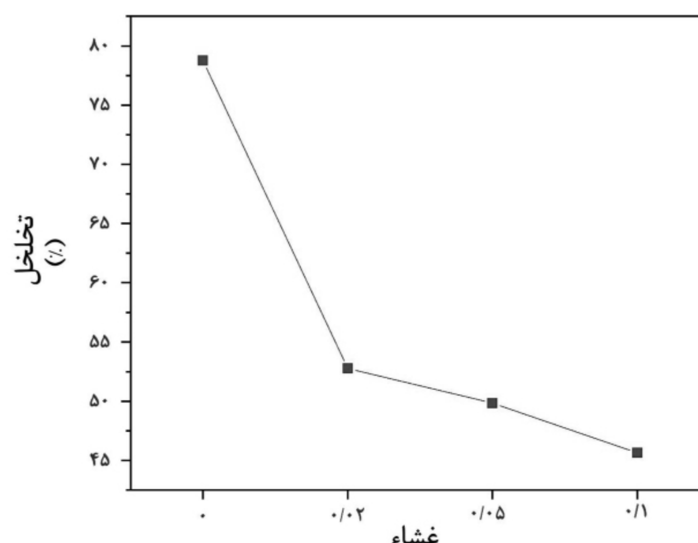
نمودارهای ارائه‌شده در شکل ۷ مربوط به منحنی غشای نانو کامپوزیتی تهیه‌شده با درصدهای مختلف نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم می‌باشد. همان‌طور که در این نمودار نیز ملاحظه می‌شود، با بالا رفتن میزان نانو ذرات در ماتریس پلیمر تخلخل کاهش می‌یابد و این امر با انسداد حفرات سطحی و عمقی ساختار نانو کامپوزیت رابطهٔ مستقیم دارد. با بالا رفتن غلظت دی‌اکسید تیتانیوم در ماتریس و بروز پدیده کلوخه شدن عملکرد مفید غشا نیز کاهش می‌یابد.

بررسی زاویه تماس آب در غشاهای نانو کامپوزیتی

میزان برهم‌کنش یک غشا یا سطح با مولکول‌های آب، معیار بسیار مهمی است.



شکل ۶ میزان تورم غشاهای نانو کامپوزیت تهیه‌شده با نسبت‌های وزنی مختلفی از TiO_2



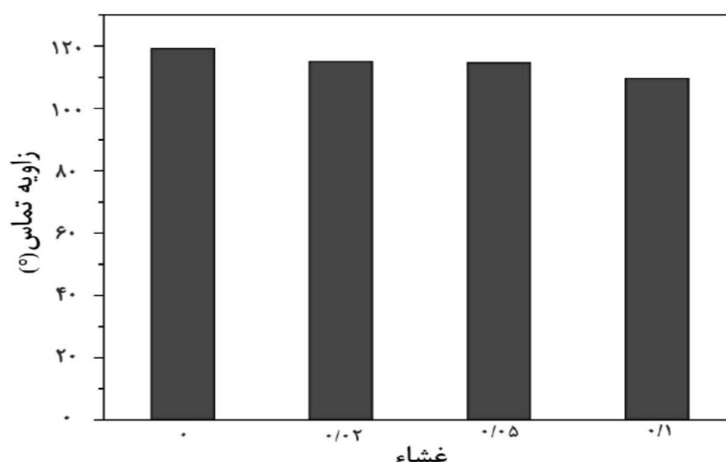
شکل ۷ میزان تخلخل غشاهای تهیه‌شده در این تحقیق با درصدهای مختلف دی‌اکسید تیتانیوم

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۱، صفحه ۱۱۹-۱۰۶

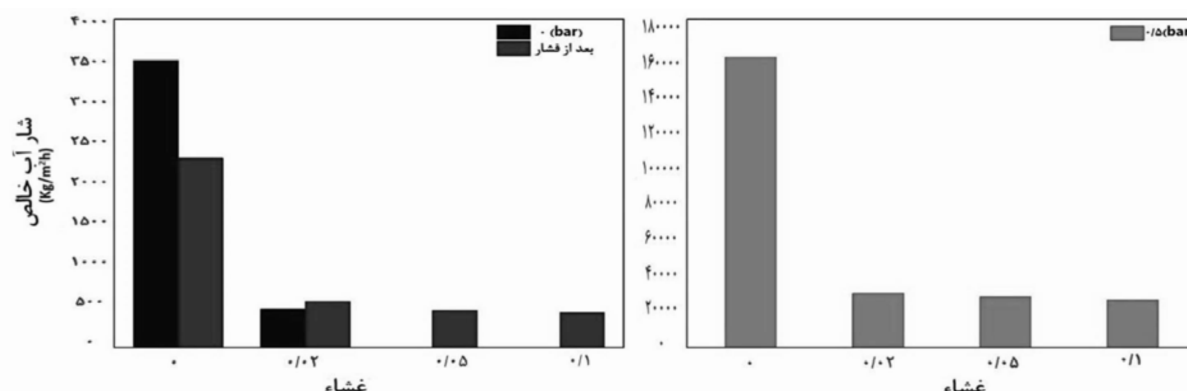
به‌نحوی تعیین‌کننده میزان آب‌دوستی و عملکرد آن غشا در برابر مواد آلاینده است. شکل ۸ نشان‌دهنده میزان زوایای تماس غشاهای مختلف نانو کامپوزیتی حاوی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم است که در مقایسه با غشای عاری از نانوذره (M۱) به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در نمودار نیز مشاهده می‌شود، با بالا رفتن میزان نانوذره در ماتریس پلی استایرن، میزان زاویه تماس کاهش می‌یابد و این امر با ماهیت آب‌دوست نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و تأثیر آن بر ماتریس آب‌گریز پلیمری ارتباط مستقیم دارد.

اندازه‌گیری شار آب خالص در غشاها

برای بررسی شار آب خالص در غشاهای تهیه‌شده، شرایط مختلفی استفاده شد. اندازه‌گیری شار بدون اِعمال فشار انجام گرفت و نتایج در شکل ۹- الف آورده شده است. این تست بار دیگر بعدازاینکه غشاها برای مدت محدودی تحت‌فشار ۰/۵ bar قرار گرفتند، در شرایط بدون فشار تکرار شد. نتایج این حالت با حالت قبلی در شکل مقایسه شده است. غشاهای M3 و M4 بدون اِعمال فشار اولیه، شاری را در شرایط بدون فشار نشان ندادند، درصورتی‌که بعد از اِعمال فشار اولیه، شار آب خالص قابل‌اندازه‌گیری بود. این نتایج نشان می‌دهد که در غشاهای حاوی نانولوله‌های تیتانیوم دی‌اکسید به‌دلیل مسدود شدن منافذ سطح، شار خروجی در فشار صفر بار مشاهده نشد. درصورتی‌که با اِعمال فشار و تر شدن نانولوله‌ها، شار قابل‌اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۸ آزمون زاویه تماس آب برای غشاهای نانو کامپوزیت PS/TiO_2 با درصدهای مختلف دی‌اکسید تیتانیوم

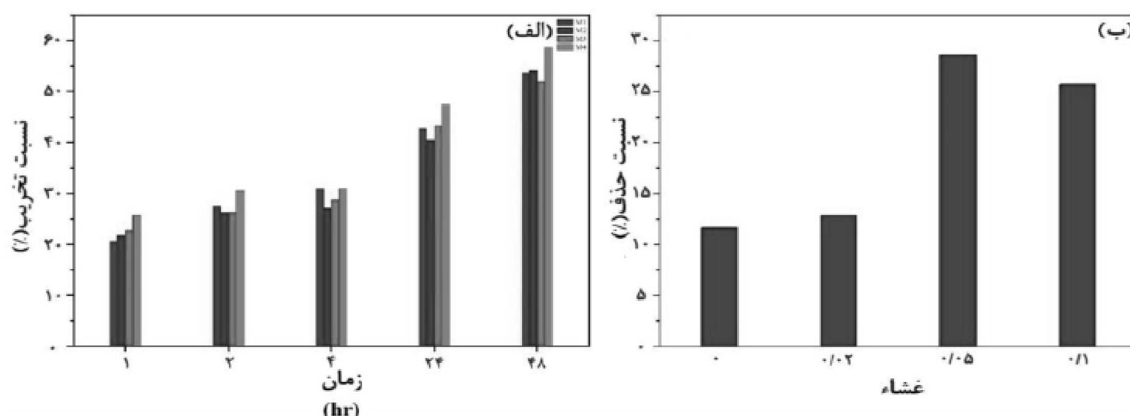


شکل ۹ الف) نمودار بررسی میزان جریان آب در غشاهای نانو کامپوزیتی پلی استایرن حاوی نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم با درصدهای مختلف تحت شرایط متفاوت اعمال فشار، ب) نمودار بررسی میزان جریان آب در غشاهای نانوکامپوزینی پلی استایرن حاوی مقادیر مختلف نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم در فشار ۰/۵ bar

تست شار در فشار ۰/۵ bar هم‌اندازه گرفته شد و نتایج در شکل ۹- ب) آورده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که نمونه عاری از نانولوله‌ها شار بسیار بالاتری نسبت به نمونه‌های نانو کامپوزیتی دارند. همچنین در غشاهای نانو کامپوزیتی با افزایش میزان نانولوله، کاهش اندکی در شار رخداده که می‌تواند به‌دلیل مسدود شدن منافذ غشاء باشد.

ارزیابی عملکرد فوتوکاتالیزوری غشاهای نانو کامپوزیت

آزمون عملکرد فوتوکاتالیزوری غشا به دو روش مختلف در این مقاله انجام شد. در آزمون اول، غشاها با وزن ۰/۰۱ g و با اندازه ۱ در ۱ cm برش داده شدند و در محلول متیلن آبی قرار گرفتند تا رفتار غشاها در حذف فوتوکاتالیزوری رنگ متیلن آبی موردبررسی قرار گیرد. نتایج این بررسی در شکل ۱۰- الف) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، غشاهای حاوی نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم دارای عملکرد بالای حذف رنگ در حضور لامپ فرابنفش با طول‌موج ۲۵۴ nm می‌باشند. بررسی میزان حذف رنگ متیلن آبی از محلول نیز به‌کمک طیف‌نورسنجی فرابنفش- مرئی انجام شد و محلول‌هایی که در مجاورت فوتوکاتالیزور قرار گرفتند، با طیف‌سنج فرابنفش اندازه‌گیری در طول‌موج ۶۶۵ nm بررسی شدند تا طبق قانون بیر-لامبرت غلظت باقی‌مانده رنگ به‌دست آید. براساس نتایج حاصل، غشای حاوی ۰/۱ g/V50 نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم دارای عملکرد حذف رنگ به بهترین نحو بود. به‌عبارت‌دیگر، با افزایش درصد نانولوله، بازده فعالیت فوتوکاتالیزوری بهبود یافت و باگذشت زمان، بازده حذف در نمونه‌ها افزایش پیدا کرد. این مشاهدات مؤید کاربری مناسب و بالقوه پرکننده فعال نوری برای حذف رنگ است. درروش دوم، غشاها در سل بارگذاری شد و محلول متیلن آبی با غلظت ۱۰ ppm از غشا تحت نور فرابنفش عبور داده شد. در غشاهای تهیه‌شده برای اصلاح غشاء از نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم استفاده شد و این ترکیب یک ماده نور فعال باقابلیت تولید حامل‌های بار در اثر تهییج فرابنفش با طول‌موج ۲۵۴ nm است، لذا در این تحقیق بر آن شدیم تا ویژگی فوتوکاتالیزوری این غشاهای نانو کامپوزیتی را به‌همراه خاصیت فلیتراسیون رنگ توسط غشاء به‌صورت توأمان موردبررسی قرار دهیم. نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۱۰- ب) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بالا رفتن درصد نانولوله، عملکرد غشاها در حذف رنگ بهبودیافته است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، اندازه‌گیری متیلن آبی در طول ۶۶۵ nm در حضور غلظت‌های مختلف نانولوله دی‌اکسید تیتانیوم ثبت‌شده است.



شکل ۱۰ الف) نمودار حذف رنگ در حضور غشاهای تهیه‌شده با غلظت‌های مختلف نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در طول‌موج ۶۶۵ nm ناحیه فرابنفش-مرئی، ب) نمودار بررسی میزان جذب رنگ در حضور غشاهای نانو کامپوزیتی با درصد مختلف نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در آن.

غشای حاوی ۰/۰۵٪ دی‌اکسید تیتانیوم دارای بالاترین میزان فیلتراسیون و حذف رنگ بوده است. به‌نظر می‌رسد با افزایش میزان نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم تا ۰/۰۵٪، فعالیت فوتوکاتالیزوری و راندمان حذف هم‌زمان بهبود پیداکرده است ولی با افزایش مقدار آن به بیشتر از ۰/۰۵٪، به‌دلیل کلوخه شدن، راندمان غشاء در حذف متیلن آبی کم شده است. با مقایسه داده‌های حاصل از دو روش تست مشخص می‌شود که درروش حذف فتوکاتالیزوری راندمان بهتری حاصل‌شده است؛ اما با بررسی دقیق‌تر می‌توان دید که راندمان حذف در غشای بهینه (M3) با توجه به‌زمان تست در ابتدای آزمایش حذف بهتری حاصل‌شده است درصورتی‌که در تست حذف فتوکاتالیزوری راندمان ۲۵٪ بعد از ۱ h از زمان آزمایش حاصل‌شده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق غشای نانوکامپوزیتی جدیدی برای حذف ترکیبات خطرناک از قبیل متیلن آبی از نمونه‌های آبی تهیه شد. ساخت این غشاء به‌کمک دستگاه الکتروریسندگی انجام شد. لازم به ذکر است که این غشاء نانو الیافی با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت تا حضور نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در ماتریس پلی استایرن تائید گردد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که تخریب رنگ درروش ایستا (استفاده از غشاها به‌عنوان جاذب) و در زمان ۴۸ h به بهترین نحو انجام‌شده است. غشاهای نانو کامپوزیتی تهیه‌شده در فرآیند حذف فیلتراسیون رنگ نیز استفاده شدند و بهترین نتایج با استفاده از غشای حاوی g/V50 ۰/۰۵ وزنی نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم به‌دست آمد. در بررسی انجام شده کاتالیست استفاده شده چه به‌صورت تثبیت شده در سطح غشا و چه در فرآیند فیلتراسیون، حداقل در ۵ سیکل استفاده شده کاهش راندمان نداشت. از دستاوردهای این تحقیق می‌توان در اغلب صنایع غذایی و شیمیایی استفاده نمود و به‌غیراز رنگ‌ها برای حذف اغلب سموم و توکسین‌های گیاهی نیز قابل‌استفاده است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از کسانی که در طول انجام این تحقیق یاری‌رسان کار بودند، ابراز می‌دارند.

مراجع

[1]. Supply, W. U. J. W., Programme, S. M. (2014). Progress on drinking water and sanitation: update, World Health Organization, ISBN 9789241507240.
[2]. Xue, Q., Pan, X., Li, X., Zhang, J. & Guo, Q. (2017). Effective enhancement of gas separation performance in mixed matrix membranes using core/shell structured multi-walled carbon nanotube/graphene oxide nanoribbons, Nanotechnology, 28, 6: 065702, DOI 10.1088/1361-6528/aa510d.
[3]. Huang, Z. M., Zhang, Y. Z. & Kotaki, M. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, Composites Science and Technology, 63, 15: 2223-2253, doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00178-7.
[4]. Buchko, C. J.,Chen, L. C., Shen, Y. & Martin, B. C. (1999). Processing and microstructural characterization of porous biocompatible protein polymer thin films, Polymer, 40, 26: 7397-7407, doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00866-0.
[5]. Zahmatkeshan. M., Adel, M., Bahrami, S. & Esmaeili, F. (2019). Polymer-based nanofibers: preparation, fabrication, and applications, in Handbook of Nanofibers, Springer, 215-261.
[6]. Van Driel, B., Kooyman, P. J. & Van den berg, K. J. (2016). A quick assessment of the photocatalytic activity of TiO_2 pigments—From lab to conservation studio! Microchemical Journal, 126: 162-171, doi.org/10.1016/j.microc.2015.11.048.
[7]. Su, Y., Zhang, X., Han, S., Lei, L. (2008). Preparation of high efficient photoelectrode of N–F-codoped TiO_2 nanotubes, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 194, 2-3: 152-160, doi.org/10.1016/j.jphotochem.2007.08.002.

[8]. Tahmasebpoor, R., Babalou, A. A. & Shahrouzi, J. R. (2017). Theoretical and experimental studies on the anodic oxidation process for synthesis of self-ordering TiO2 nanotubes: Effect of TiO_2 nanotube lengths on photocatalytic activity, Journal of Environmental Chemical Engineering, 5, 1: 1227-1237, doi.org/10.1016/j.jece.2017.01.036.
[9]. Lee, K., Hahn, R., Altomare, M. & Selli, E. (2013). Intrinsic Au decoration of growing TiO_2 nanotubes and formation of a high-efficiency photocatalyst for H_2 Production, Advanced materials, 25(42): 6133-6137, doi.org/10.1002/adma.201302581.
[10]. Jaleh, B., Madad, M. S.,Tabrizi, M. F. & Habibi, S. (2011). UV-degradation effect on optical and surface properties of polystyrene-TiO_2 nanocomposite film, Journal of the Iranian Chemical Society, 8(1): S161-S168.
[11]. Pasichnyk, M., Václavíková, M. & Melnyk, I. (2021). Fabrication of polystyrene-acrylic/ZnO nanocomposite films for effective removal of methylene blue dye from water, Journal of Polymer Research, 28(2): 1-15.
[12]. Khan, S. U. M., Al-Shahry, M. & Ingler Jr, W. B. (2002). Efficient photochemical water splitting by a chemically modified n-TiO_2, Science, 297(5590): 2243-2245, doi: 10.1126/science.1075035.
[13]. Kwak, S. Y., Kim, S. H., Kim, S. S. (2001). Hybrid organic/inorganic reverse osmosis (RO) membrane for bactericidal anti-fouling 1, Preparation and characterization of TiO_2 nanoparticle self-assembled aromatic polyamide thin-film-composite (TFC) membrane, Environmental science and technology, 35(11): 2388-2394, doi.org/10.1021/es0017099.
[14]. You, S. J., Sembelante, G. U., Lu, S. C. & Damodar, R. A. (2012). Evaluation of the antifouling and photocatalytic properties of poly (vinylidene fluoride) plasma-grafted poly (acrylic acid) membrane with self-assembled TiO_2, Journal of Hazardous Materials, 237: 10-19, doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.071.
[15]. Javed, H. M. A., Que, W., Ahmad, M. R., Ali, K., Irfan Ahmad, M., Haq, A. U. & Sharma, S. K. (2020). Perspective of nanomaterials in the performance of solar cells, Solar Cells: From Materials to Device Technology, Springer, 25-54.
[16]. Chen, H. Y., Zhang, T. L., Fan. J., Kuang, D. B. & Su, C. Y. (2013). Electrospun hierarchical TiO_2 nanorods with high porosity for efficient dye-sensitized solar cells, ACS applied Materials and Interfaces, 5(18): 9205-9211, doi.org/10.1021/am402853q.
[17]. Dhandole, L. K., Mahadik, M. A., Kim, S. G., Chung, H. S., Seo, Y. S., Cho, M., Ryu, J. H. & Jang, J. S. (2017). Boosting photocatalytic performance of inactive rutile TiO_2 nanorods under solar light irradiation: synergistic effect of acid treatment and metal oxide co-catalysts, ACS applied materials & interfaces, 9, 28: 23602-23613, doi.org/10.1021/acsami.7b02104.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۳۴-۱۲۰

تطابق چینه‌ای زیرسطحی سازند آسماری در میدان آغاجاری و استفاده از آن در کنترل زون بندی مخزن

رضا فتحی ایسوند[1] رضا موسوی حرمی[1*] اسدالله محبوبی[1] و علی بهداد[2]
۱-گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
۲- شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶

چکیده

در این مطالعه، تطابق چینه‌ای زیرسطحی مخزن آسماری در میدان آغاجاری بر اساس یک چارچوب زمانی دقیق متشکل از ۹ خط زمانی ارائه شده است. خطوط زمانی با استفاده از نرم افزار سیکلولاگ به‌دست آمد که منطبق بر سطوح چینه‌ای مهم مانند مرزهای سکانسی و سطوح حداکثر پیشروی سطح آب بودند. تعیین سن خطوط زمانی با استفاده از جدیدترین جداول زون‌های زیستی سازند آسماری صورت گرفت. مرزهای زمانی منطبق بر مرزهای سکانسی بین آشکوب‌های روپلین-شاتین، شاتین، آکی‌تانین و بوردیگالین، به عنوان مرزهای زمانی اصلی و مرزهای منطبق بر سطوح حداکثر پیشروی سطح آب دریا به عنوان مرزهای زمانی فرعی در نظر گرفته شدند. بر اساس این چارچوب زمانی، چهار بسته یا واحد چینه‌ای با ویژگی‌های رخساره‌ای و زیستی خاص خود شناسایی و نام‌گذاری گردید. با استفاده از چارچوب زمانی و با توجه به مطالعات رخساره‌های رسوبی و چینه‌ای مرز سازندهای آسماری و پابده مورد بازنگری قرار گرفت و با دقت بیشتری تعیین گردید. همچنین زون‌بندی قبلی مخزن آسماری در میدان آغاجاری مورد بازنگری قرار گرفت و با در نظر گرفتن کیفیت مخزنی، زون‌بندی جدیدی پیشنهاد گردید. زون‌بندی قبلی متشکل از ۵ زون اصلی و ۷ زیر زون فرعی در زون‌بندی جدید به ۷ زون اصلی، بدون زیر زون فرعی تغییر یافت. عملکرد گسل پی‌سنگی هندیجان و بلندای دیرینه مرتبط با آن در شرق میدان آغاجاری، ضمن ایجاد تغییرات و حذف بخشی از ضخامت سازندهای زیرین، موجب تغییر ضخامت واحدهای چینه‌ای سازند آسماری و ایجاد پیچیدگی‌هایی در هندسه رسوبات این سازند شده است حاصل این اتفاق، به اشکالات و ابهاماتی در زون‌بندی قبلی منتهی شده بود که با استفاده از زون‌بندی جدید بر مبنای چارچوب زمانی، رفع گردید.

کلمات کلیدی: تطابق چینه‌ای، چارچوب زمانی، واحد چینه‌ای، زون‌بندی مخزن، نرم‌افزار سیکلولاگ.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی moussavi@um.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.4992.3226)

مقدمه

سازند آسماری در میدان آغاجاری از سنگ‌های کربناته شامل سنگ آهک، دولومیت و همچنین ماسه سنگ، شیل و مارن تشکیل شده است. شیل و مارن عمدتاً در بخش‌های قاعده سازند آسماری (زون تدریجی) در تناوب با سنگ آهک و گاه ماسه سنگ دیده می‌شود. مرز بالایی سازند آسماری با سازند گچساران به صورت ناگهانی و مرز پایینی با سازند پابده با واسطه لایه‌های متناوب شیل، مارن، سنگ آهک مارنی و ماسه سنگ فسیل‌دار به صورت تدریجی است. در بخش غربی میدان، در مجاورت میدان مارون، ماسه سنگ‌ها بخصوص در بخش‌های میانی و پایینی سازند آسماری گسترش بیشتری دارند. تاریخچه عملکرد گسل پی‌سنگی هندیجان واقع در مرز بین میدان آغاجاری و پازنان، باعث ایجاد بلندای دیرینه هندیجان شده است. نیمرخ‌های لرزه‌ای و اطلاعات چاه‌های حفاری شده بیانگر تغییرات ضخامت و گاه حذف قسمتی از سازندهای سروک، ایلام و گورپی در بازه زمانی کرتاسه میانی تا میوسن پایین در این منطقه است [۱-۳]. در مورد سازند آسماری، تغییرات ضخامت در میدان آغاجاری به نحوی است که از غرب به شرق میدان (به سمت مرز میدان‌های آغاجاری و پازنان، محل عبور گسل پی‌سنگی هندیجان و بلندای دیرینه حاصل از آن) کاهش می‌یابد به‌طوری که از حدود ۴۴۰ m در غرب میدان به حدود ۲۵۵ m در شرق میدان می‌رسد. این ویژگی، با ایجاد پیچیدگی‌های ساختمانی و تغییر در هندسه رسوبات و گسترش رخساره‌های رسوبی در شرق میدان آغاجاری، موجب بروز مشکلات و ابهاماتی در فرآیند انطباق چینه‌ای و زون‌بندی مخزن آسماری شده است. زون‌بندی قبلی مخزن آسماری در میدان مورد مطالعه، مشتمل بر ۵ زون اصلی و ۷ زیر زون فرعی، بدون در نظر گرفتن چارچوب زمانی و صرفاً بر اساس تطابق ویژگی‌های سنگ‌شناسی صورت گرفته است. در این بخش از میدان، تعدادی از زون‌های مخزنی مرزهای زمانی را قطع می‌کنند. همچنین، مرز زون‌های مخزنی در تعدادی از چاه‌ها به طور صحیح تعیین نشده و اختلافاتی با چاه نمونه ۱۲۱ آغاجاری دارند. با توجه به اهمیت تطابق چینه‌ای و زون بندی مخزن، در کمک به انجام بهتر مدل‌سازی استاتیک زمین‌شناسی، و نیز جهت رفع مشکلات و ابهامات گفته شده در بخش شرقی میدان، ضرورت انجام بازنگری در تطابق چینه‌ای و نحوه زون‌بندی مخزن آسماری در این میدان بر اساس چارچوب زمانی دقیق احساس می‌شد.

استفاده از خطوط زمانی در تطابق چینه‌ای و کنترل زون‌بندی مخزن از چندین دهه گذشته مورد استفاده بوده است. زون‌بندی مخازن هیدروکربوری بر اساس دیدگاه و قوانین لیتواستراتیگرافیک که در گذشته رایج بوده است شاید در فواصل کم بین چاه‌ها مشکلی ایجاد نکند اما در مقیاس میدان‌های بزرگ، به علت تأثیر عوامل زمین‌شناسی مختلف اشکالات و ابهامات زیادی به وجود می‌آورد. بنابراین در مطالعات جدید چینه‌شناسی و مخزنی استفاده از روش‌های مبتنی بر خطوط زمانی در تطابق چینه‌ای و زون بندی مخازن امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این راه، شناسایی و تطابق سطوح مهم چینه‌ای با سن تقریبا یکسان (مانند سطوح ناپیوستگی، مرزهای سکانسی و سطوح حداکثر پیشروی) می‌توانند بسیار کارآمد باشد [۴]. در دو دهه گذشته محققین مختلفی، از روش‌های مطالعه مبتنی بر خطوط زمانی (چینه‌نگاری سکانسی و چینه‌نگاری اقلیمی در قالب نرم‌افزار سیکلولاگ) در مطالعات سطح‌الارضی و زیرسطحی در مقیاس ناحیه‌ای بهره برده‌اند [۵-۱۰]. همچنین افراد مختلفی در مطالعات خود در مقیاس میدان، از روش‌های مبتنی بر خطوط زمانی در زون‌بندی مخزن استفاده نموده‌اند [۱۰-۸]. هدف اصلی این مطالعه، رفع ایرادات و ابهامات گفته شده در زون‌بندی قبلی مخزن، از طریق ایجاد یک چارچوب دقیق زمانی با استفاده از نرم‌افزار سیکلولاگ و برقراری تطابق چینه‌ای با کیفیت بالا

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۳۴-۱۲۰

در مخزن آسماری میدان آغاجاری است.

جایگاه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کمربند کوهزایی زاگرس به طول حدود ۲۰۰۰ km از همگرایی بین اوراسیا و قطعات مشتق شده از گندوانا حاصل شده است [۱۲]. گسل‌های پی‌سنگی عمیق نقش مهمی در کنترل چینه‌شناسی حوضه داشته و زاگرس چین خورده را به پهنه‌های ساختاری جداگانه با ویژگی‌های چینه‌شناسی و رئولوژیکی خاص خود (زون فارس، فروافتادگی دزفول و زون لرستان) تقسیم‌بندی کرده است [۱۳]. این گسل‌ها در طول زمان زمین‌شناسی، دوره‌های آرامش و تجدید فعالیت متعددی پشت سر گذاشته‌اند. کرتاسه پسین مهم‌ترین دوره فعالیت مجدد این گسل‌ها بوده است که یکی از پیامدهای مهم آن ایجاد بلنداهای دیرینه[1] مرتبط به آنها است [۳-۱ و ۱۴]. منطقه مورد مطالعه، میدان آغاجاری، واقع در بخش مرکزی فروافتادگی دزفول است (شکل ۱) که همان‌طور که قبلاً گفته شد عملکرد گسل پی سنگی هندیجان و بلندای دیرینه مرتبط با آن باعث بروز تغییراتی در ضخامت سازندهای مختلف در آن شده است. این میدان از دیدگاه سیستم‌های رسوبی چهارگانه معرفی شده برای سازند آسماری [۷] در سیستم رسوبی مخلوط کربناته-سیلیسی آواری قرار گرفته است (شکل ۲).

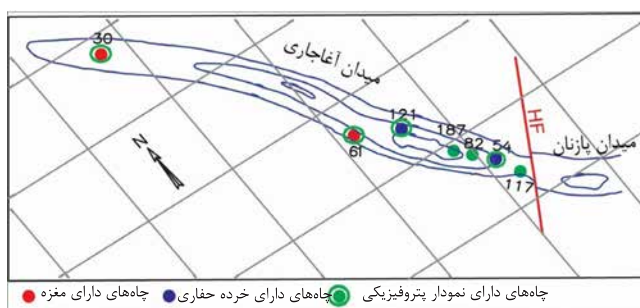
شکل ۱ موقعیت میدان آغاجاری در فروافتادگی دزفول [۲۶]

شکل ۲ موقعیت منطقه مورد مطالعه در فروافتادگی دزفول بر اساس گسترش سیستم‌های رسوبی [۷]

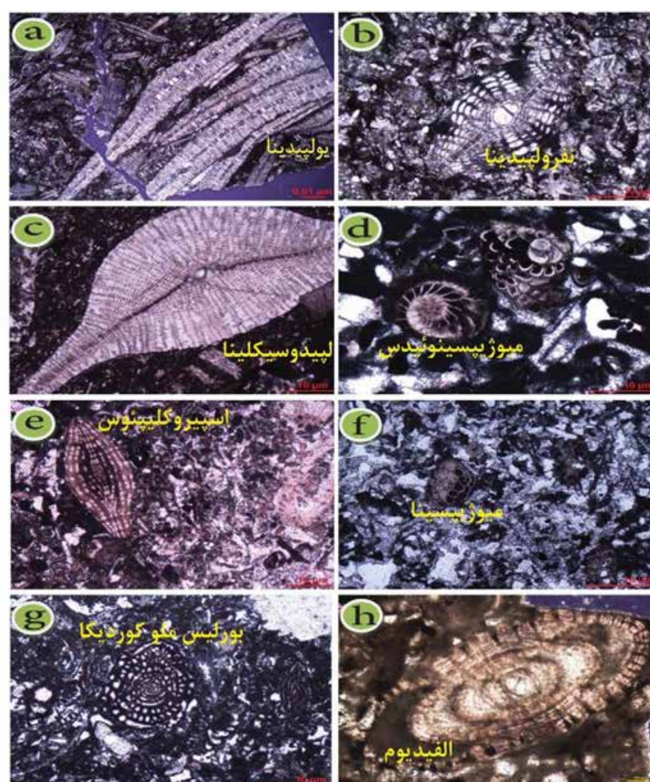
1. Paleo-high
2. Large Benthic Foraminifera (LBF)

در ایـن مطالعـه، چارچـوب زمانـی دقیقـی بـا اسـتفاده از نمـودار گامـای مربـوط بـه تعـداد ۷ حلقـه چـاه در نرم‌افـزار سـیکلولاگ ایجـاد گردیـد (شـکل ۳). جهـت تعییـن سـن خطـوط زمانـی، از جدیدتریـن جـدول زون‌هـای زیسـتی الله کرم‌پـور دیـل و همـکاران [۱۶] کـه حاصـل کالیبـره کـردن سـن فسـیل‌های شـاخص روزنـداران بـزرگ کـفزی[۲] (LBF) بـا داده‌هـای سـن سـنجی ایزوتـوپ استرانسـیوم اسـت اسـتفاده گردیـد (شـکل ۴).

در بخـش مطالعـه رخسـاره‌های رسـوبی، ضمـن اسـتفاده از داده‌هـای آنالیـز رخسـاره‌ای قبلـی در یـال جنوبـی اینتراشـلف آسـماری [۱۷] تعـداد ۳۵۰ مقطـع نـازک میکروسـکوپی دیگـر مربـوط بـه چاه‌هـای آغاجـاری ۵۴ و ۱۲۱ مـورد مطالعـه قـرار گرفـت. طبقه‌بنـدی اصـلاح شـده دانهـام [۱۸] توسـط امبـری و کلـوان [۱۹] بـرای توصیـف سـنگ‌های کربناتـه مـورد اسـتفاده قـرار گرفـت. تفسـیر رخسـاره‌ها و محیط‌هـای رسـوبی بـر اسـاس تلفیـق همـه داده‌ها و مقایسـه آنها بـا مقالات و گزارشـات اخیـر [۵ و ۱۰-۷] صـورت گرفـت. بـا اسـتفاده از چارچـوب زمانـی و مطالعـات رسوب‌شناسـی و چینه‌شناسـی، واحدهـای چینـه‌ای بـا ویژگی‌هـای زیسـتی خـاص خـود شناسـایی گردیـد.



شکل ۳ نقشه UGC افق آسماری میدان آغاجاری و موقعیت چاه‌های مورد مطالعه



شکل ۴ مجموعه فسیل¬های فرامینیفرهای بزرگ شاخص (index LBF) سازند آسماری شناسایی شده در میدان آغاجاری

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۳۴-۱۲۰

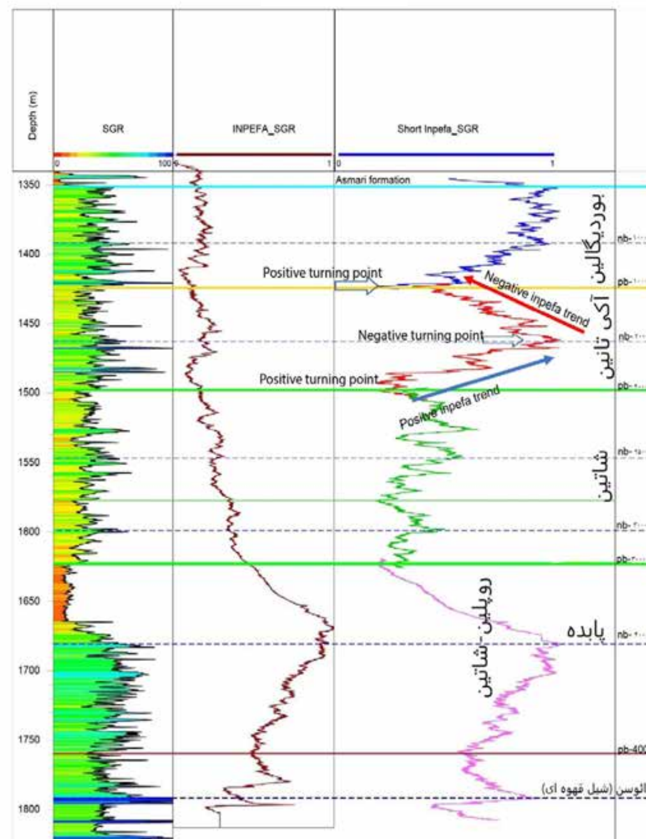
چارچوب زمانی

در سال‌های اخیر، استفاده از نرم‌افزار سیکلولاگ جهت بررسی رخدادهای تقریباً هم زمان، روندی روزافزون پیدا کرده است. این نرم‌افزار با استفاده از تئوری چرخه‌ای متأثر از اقلیم[1] و استخراج سیگنال‌های اقلیمی از نمودارهای حساس به رخساره[2] مانند لاگ گاما، امکان ساختن چارچوب چینه‌ای-زمانی برای تطابق چینه‌ای را فراهم می‌سازد [۲۱]. در این نرم‌افزار، با استفاده از داده‌های نمودار گاما (CGR/SGR)، نمودار INPEFA[3] تولید می‌شود که الگوی ظاهری آنها در برقراری انطباق بین چاه‌ها اهمیت دارد [۲۱]. نقاط چرخش و برگشت منحنی‌های نمودار INPEFA ویژگی ارزشمندی است که ارزش زمانی داشته و معرف تغییرات مهم و همزمان در رژیم رسوب‌گذاری ناشی از تغییرات اقلیمی، حوادث ناحیه‌ای بزرگ [۲۲] و یا تغییر در روندهای رسوب‌گذاری می‌باشد [۴] که بین چاه‌ها قابل انطباق می‌باشند. در نمودار INPEFA روند افزایشی رو به بالا را، روند مثبت و روند کاهشی را روند منفی می‌نامند. روند مثبت معمولاً معرف پیشروی دریا[4] و روند منفی معمولاً معرف پسروی دریا[5] است [۲۲] نقاط چرخش و برگشت منحنی‌های نمودار INPEFA شامل نقطه تغییر روند منفی[6] به مثبت و نقطه تغییر روند مثبت به منفی[7] می‌باشند (شکل ۵). به‌طور کلی، تغییرات روند مثبت (Pb) در مرزهای سکانسی[8] (SB) رخ می‌دهد و تغییرات روند منفی (NB) سطوح حداکثر سیلابی[9] (MFS) را نشان می‌دهند. نقاط چرخش و برگشت (PB و NB) منحنی‌های نمودار INPEFA، دارای ارزش زمانی، به عنوان خطوط زمانی در هر چاه به کار می‌روند. در این مطالعه، جهت تهیه چارچوب زمانی، تعداد ۴ مرز PB و ۵ مرز NB به عنوان خطوط زمانی در هر چاه مورد استفاده قرار گرفتند و از اتصال آنها به هم چارچوب زمانی به‌دست آمد (جدول ۱ و شکل ۵). با توجه به نبود داده‌های سن سنجی ایزوتوپ استرانسیوم برای میدان مورد مطالعه و این نکته که در مطالعه الله کرم‌پور دیل و همکاران [۱۶]، انطباق خوبی با دقت حدود نیم میلیون سال بین فسیل‌های روزنداران شاخص و سن سنجی به روش ایزوتوپ استرانسیوم (Sr) در مطالعات چینه‌شناسی سازند آسماری زون ایذه و فروافتادگی دزفول به‌دست آمده بود، در این مطالعه، جدیدترین جدول زون‌های زیستی الله کرم‌پور دیل و همکاران [۱۶] در تعیین سن خطوط زمانی اصلی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱ خطوط زمانی تعیین شده در این مطالعه و تعیین سن آنها با استفاده از جدول زون‌های زیستی

Pb-Nb	سن	آشکوب	سازند	**
Nb-1000 Pb-1000	۲۰/۴۴	بوردیگالین	آسماری	میوسن
Nb-2000 Pb-2000	۲۳/۰۳	آکی تانین	آسماری	میوسن
Nb-2500 Nb-3000 Pb-3000	۲۷/۸۵	شاتین	آسماری	الیگوسن
Nb-4000 Pb-4000	روپلین-شاتین		پابده	الیگوسن

1. Theory of climate-driven Cyclicity
2. Facies-Sensitive Logs
3. Integrated Predicate Error Filter (INPEFA)
4. Transgressive
5. Regressive
6. Positive Turning Point
7. Negative Turning Point
8. Sequence Boundary (SB)
9. Maximum Flooding Surface (MFS)



شکل ۵ نمایی از تفسیر منحنی INPEFA در نرم‌افزارسیکلولاگ در چاه ۱۸۷ آغاجاری همراه با مرزهای زمانی اصلی و فرعی

چینه‌نگاری زیستی

درده‌های گذشته، زیست چینه‌نگاری رسوبات الیگومیوسن زاگرس توسط محققین مختلفی انجام گرفته است [۲۳ تا ۲۵] که مهم‌ترین ایراد آنها عدم تفکیک آشکوب‌های روپلین و شاتین بود. در سال‌های اخیر، محققین مختلفی از داده‌های سن سنجی ایزوتوپ استرانسیم در تعیین سن سازند آسماری استفاده نموده و ضمن انطباق آن با فسیل‌های روزنداران بزرگ (LBF) شاخص، زون‌بندی زیستی دقیق‌تری برای سازند آسماری ارائه نموده‌اند [۵، ۷، ۱۹]. در این مطالعه با بررسی فسیل‌های روزنداران بزرگ شاخص (شکل۶) و استفاده از جدول زون‌بندی زیستی جدید الله کرم‌پور دیل و همکاران [۱۶] هفت زون زیستی (A، B، C، D، E، F، G) مربوط به آشکوب‌های روپلین-شاتین تا بوردیگالین تعیین گردید که در تعیین سن خطوط زمانی مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۲).

توصیف رخساره‌های رسوبی

در این تحقیق، با استفاده از داده‌های چاه‌های ۶۱ و ۳۰ میدان آغاجاری [۱۷]، و مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی مربوط به چاه‌های ۵۴ و ۱۲۱ از جنبه‌های مختلف خصوصیات سنگ‌شناسی، بافتی و اجزای تشکیل‌دهنده رسوبات (روزنداران بنتیک، مرجان‌ها و جلبک‌ها)، تعداد ۱۲ رخساره شناسایی گردید (جدول ۳) که در ۴ زیرمحیط رمپ بیرونی، رمپ میانی، پشته کم عمق[1] و رمپ داخلی قرار گرفتند (شکل‌های ۶ و ۷). رخساره‌های شناسایی شده در این مطالعه به صورت خلاصه در جدول ۳ (همراه با داده‌های چاه‌های ۳۰ و ۶۱ مربوط به مطالعات قبلی) آورده شده است.

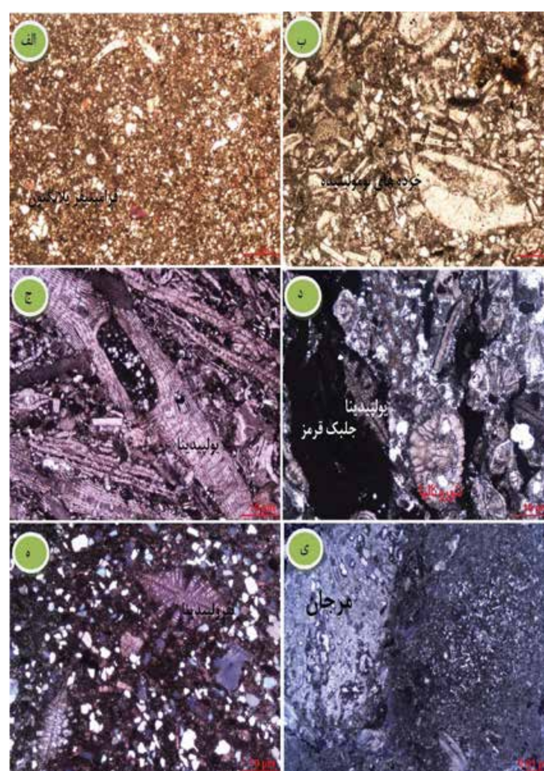
1. Shoal

جدول ۲ زون‌های زیستی معرفی شده برای سازند آسماری میدان آغاجاری [۱۷] با اضافه نمودن چاه‌های ۵۴ و ۱۲۱).

چاه Aj-121	چاه Aj-61	چاه Aj-30	چاه Aj-54	زون های زیستی آسماری (الله کرم پور دیل، ۲۰۲۰)			زون‌های زیستی (این مطالعه)	زون‌های زیستی الله کرم‌پور دیل (۲۰۲۰)		آشکوب	دوره
×	×	×	×	بیوفاسیس گلوبیژرینا	زون زیستی بورلیس ملو		G	10		بوردیگالین	میوسن
×	×	×	×		زون زیستی دندریتینا رنجی		F	9		آکی تانین	
					زون زیستی میوژیپسینا		E	8			
×	×	×	×		زون تجمعی آرکیاس کیرکوئنسیس، آرکیاس آسماریکوس، آرکیاس هنسونی،میوژیپسینوئیدس،		D	7		شاتین	الیگوسن
×	×	×	×		زون اسپسروکلیپئوس و میوژیپسینوئیدس	زون تجمعی اسپیروکلیپئوس، میوژیپسینوئیدس و پولیدینا	C	6	6-B		
×	×	×	×		زون اسپیروکلیپئوس و پولیپدینا		B		6-A	روپلین-شاتین	
					زون تجمعی لپیدوسیکلینا و نومولیتس			5		روپلین	
					زون لپیدوسیکلینا			4			
					زون نومولیتس و آرکیاس اپرکولینوفرمیس			3			
					زون نومولیتس			2			
×	×		×		بیوفاسیس گلوبیژرینا		A	1			ائوسن

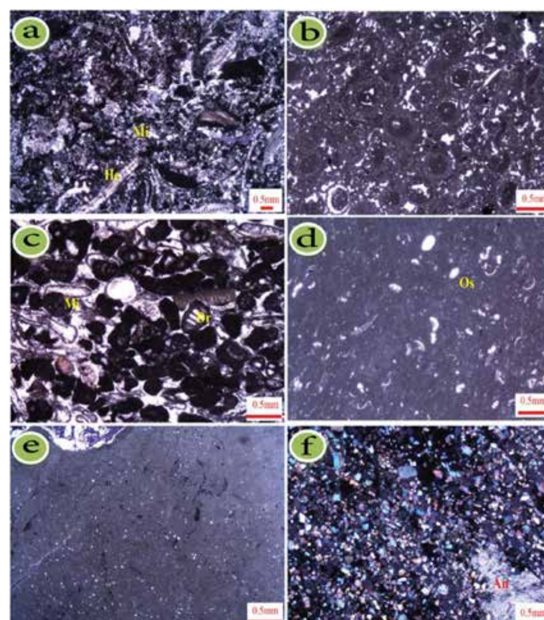
جدول ۳ جدول بروزرسانی شده مربوط به توصیف رخساره‌ها و محیط رسوبی سازند آسماری در میدان آغاجاری [۱۷] با اضافه نمودن چاه‌های ۵۴ و ۱۲۱)

محیط / زیر محیط رسوبی	سن				چاه				اجزای اصلی	نام رخساره	رخساره
	بوردیگالین	آکی تانین	شاتین	روپلین-شاتین	Aj-54	Aj-121	AJ-61	AJ-30			
رمپ داخلی	×	×	×	×			×	×	ذرات ماسه کوارتزی نیمه زاویه دار با زمینه میکریتی و گاهی پچ‌های انیدریتی	سیلتستون و ماسه سنگ میکریتی	۱۲
	×	×	×			×	×	×	مادستون حاوی ذرات ماسه ای	مادستون حاوی ذرات ماسه	۱۱
	×	×	×		×	×	×	×	مادستون حاوی پچ‌های انیدریت	مادستون(دولومادستون)	
رمپ داخلی-لاگون حفاظت شده	×	×	×		×	×	×	×	میلیولید، استراکودا، نرم تنان، روتالیای کوچک، اکینوئید و دیسکوربیس	وکستون حاوی فرامینیفرهای بدون منفذ	۱۰
رمپ داخلی-لاگون باز	×	×	×		×	×	×	×	پنروپولیس، دندریتینا، آستروتریلینا، والولینید، میلیولید	گرینستون-پکستون با تنوع بالای فرامینیفرهای بدون منفذ	۹
رمپ داخلی-پشته‌های کم عمق(شول)	×	×			×	×	×	×	بیوکلیت، پلویید، االیید	االیید گرینستون بیوکلست و پلویید دار	۸
رمپ میانی		×	×	×	×	×	×	×	نئوروتالیا، میوژیپسینوئیدس، آمفیستژینا، آرکباس، میلیولید، جلبک قرمز	پکستون حاوی کرالیناسه آ و فرامینیفرهای بدون منفذ و منفذدار	۷
رمپ میانی	×	×	×	×	×	×	×	×	مرجان، جلبک قرمز، بریوزوآ، میلیولیده، آرکیاس، آمفیستژینا، روتالید	پکستون تا فلوتستون /رودستون حاوی کرال کرالیناسه آ	۶
رمپ میانی			×	×		×	×	×	ذرات ماسه کوارتزی ریز تا متوسط دانه، خرده‌های نومولیتیده، لپیدوسیکلینیده، میلیولیده، اکینویید و دو کفه‌ای	وکستون حاوی لپیدوسیکلینیده و نومولیتیده با ذرات ماسه	۵
رمپ میانی			×	×	×	×	×	×	نئوروتالیا، اپرکولینا، هترستژینا، دیتروپا، هترستژینا، میوژیپسینوئیدس، آمفیستژینا، نفرولپیدینا، یولپیدینا، جلبک قرمز و مرجان	گرینستون حاوی لپیدوسیکلینیده و نومولیتیده	۴
بخش دورتر رمپ میانی			×	×	×	×	×	×	نئوروتالیا، اپرکولینا، هترستژینا، دیتروپا، هترستژینا، میوژیپسینوئیدس، آمفیستژینا، نفرولپیدینا، یولپیدینا، جلبک قرمز و مرجان	فلوتستون/رودستون حاوی لپیدوسیکلینیده و نومولیتیده	۳
رمپ بیرونی				×	×	×	×	×	فرامینیفرهای پلانگتون، دیتروپا، اپرکولینا، یولپیدینا، آمفیستژینا	وکستون حاوی فرامینیفرهای پلاژیک و بیوکلست همراه با خرده‌های حمل شده نومولیتیده و لپیدوسیکلینیده	۲
رمپ بیرونی-حوضه									فرامینیفرهای پلانگتون، دیتروپا، اپرکولینا	وکستون -پکستون حاوی فرامینیفرهای پلانکتون	۱



شکل ۶ رخساره‌های شناسایی شده ۱ تا ۶ میدان آغاجاری

الف) رخساره شماره ۱: وکستون با فرامینیفرهای پلانکتون (عمق ۷۱۵۰ فوت چاه ۵۴ آغاجاری) ب) رخساره شماره ۲: پکستون حاوی فرامینیفرهای پلاژیک و بیوکلست همراه با خرده‌های حمل شده نومولیتیده و لپیدوسیکلینیده (عمق ۷۱۰۰ فوت چاه ۵۴ آغاجاری) ج) رخساره شماره ۳: رودستون حاوی لپیدوسیکلینیده و نومولیتیده (عمق ۹۶۳۶ فوت چاه ۶۱ آغاجاری) د) رخساره شماره ۴: گرینستون حاوی لپیدوسیکلینیده و نومولیتیده حاوی نئوروتالیا (عمق ۷۳۳۵ فوت چاه ۶۱ آغاجاری) ه) وکستون ماسه دار حاوی یولپیدینا (عمق ۹۵۶۵ فوت چاه ۶۱ آغاجاری) ی) پکستون / فلوتستون با خرده‌های مرجانی و فرامینیفرهای بدون منفذ (عمق ۶۸۶۶ فوت چاه ۳۰ آغاجاری)



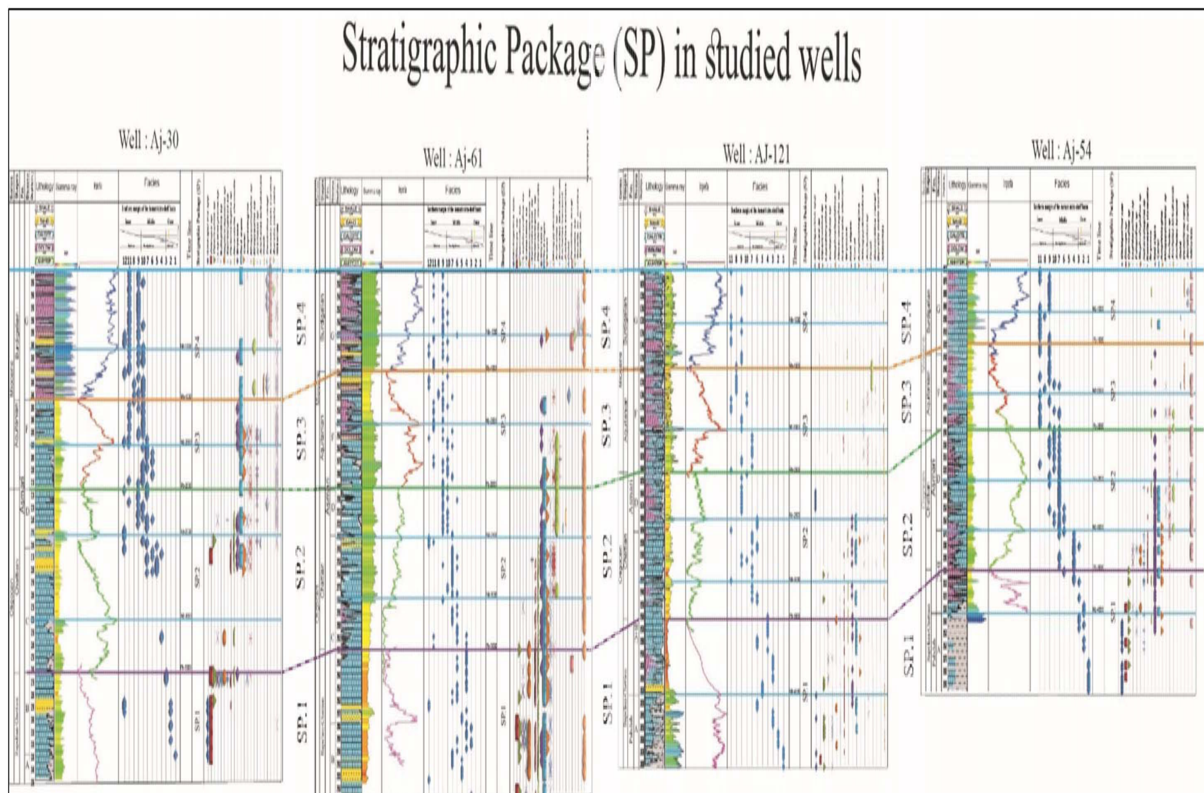
شکل ۷ رخساره‌های شناسایی شده ۷تا ۱۲ میدان آغاجاری

الف) رخساره شماره ۷: پکستون حاوی کرالیناسه آ و فرامینیفرهای بدون منفذ همراه با فونای دریای باز (عمق ۹۳۶۹ فوت چاه ۶۱ آغاجاری) ب) پلویید اایید گرینستون همراه با دانه‌های اایید (عمق ۸۵۹۷ فوت چاه ۳۰ آغاجاری) ج) گرینستون با تنوع بالای فرامینیفرهای بدون منفذ (عمق ۶۳۹۴ فوت چاه ۳۰ آغاجاری) د) وکستون با فرامینیفرهای بدون منفذ (عمق ۸۴۱۴ فوت چاه ۶۱ آغاجاری) ه) دولومیت مادستون با پچ‌های انیدریتی (عمق ۸۴۵۲ فوت چاه ۶۱ آغاجاری) ی) ماسه سنگ میکریتی با پچ‌های انیدریتی (عمق ۸۴۱۶ فوت چاه ۶۱ آغاجاری)

بســـته‌های زمان-چینـــه‌ای ســـازند آســـماری در میـــدان آغاجـــاری

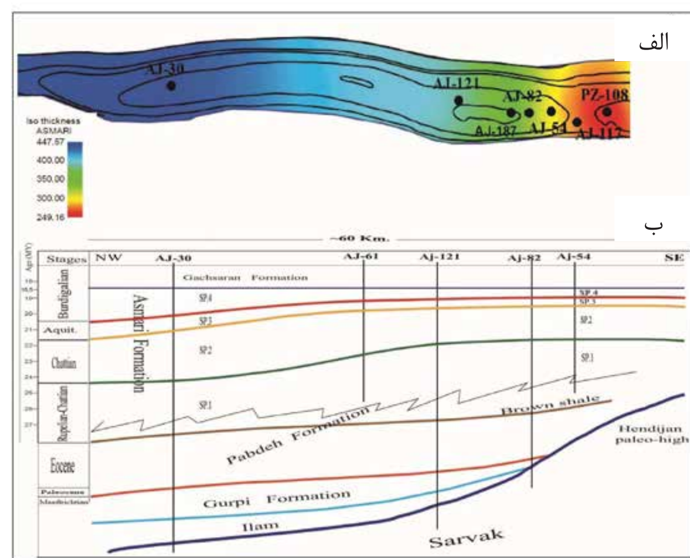
بـا بررسـی الگوهـای مشـابه منحنی‌هـای نمـودار INPEFA در چاه‌هـای مـورد مطالعـه و تلفیـق آن بـا مطالعـات رسوب‌شناسـی و چینه‌شناسـی، تعـداد ۴ بسـته یـا واحـد چینـه‌ای[1] بـا ویژگی‌هـای رسـوبی و زیسـتی خـاص خـود شناسـایی گردیـد. تغییـرات جانبـی در ضخامـت، محتـوای زیسـتی و رخسـاره‌ای ایـن واحدهـا، قابـل دنبـال کـردن در کل میـدان می‌باشـند (شـکل‌های ۸ تـا ۱۰). واحدهـای چینـه‌ای از پاییـن بـه بـالا عبارتنـد از:

واحـد چینـه‌ای ۱: ترکیـب سنگ‌شناسـی ایـن واحـد در برگیرنـده مخلـوط کربنـات/ سیلیسـی آواری (سـنگ آهـک، شـیل، سـنگ آهـک ماسـه‌ای و سـنگ آهـک مارنـی) مربـوط بـه قاعـده سـازند آسـماری (زون تدریجی) و بخـش بالایـی سـازند پابـده می‌باشـد. مـرز بالایـی آن کـه معـرف یـک مـرز سکانسـی اسـت (Pb-3000) منطبـق بـر مـرز آشـکوب روپلین-شـاتین و از طرفـی منطبـق بـر یـک مـرز زیسـت چینه‌نـگاری مهـم و قابل‌توجـه نیـز می‌باشـد کـه تقریبـاً نزدیـک بـه آخریـن حـد ظهـور مجموعـه فسـیلی روزنـداران بـزرگ شـامل Lepidocyclina، Nephrolepidina، Operculina، Ditrupa انتخـاب شـده اسـت.

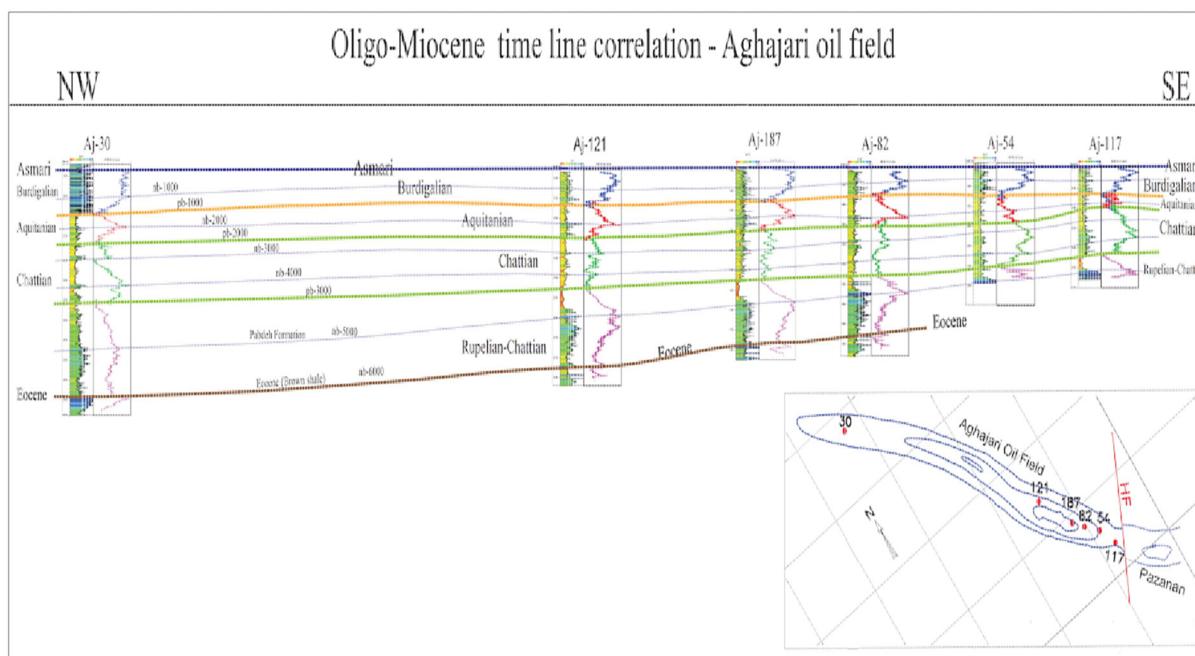


شکل ۸ تطابق واحدهای چینه‌ای سازند آسماری در چاه‌های مورد مطالعه. مرز بالایی سازند آسماری به گچساران به عنوان خط مبنا در نظر گرفته شده است.

1. Stratigraphic Package



شکل ۹ الف) نقشه تغییرات ضخامت سازند آسماری در میدان آغاجاری ب) طرح ساده از تطابق واحدهای چینه‌ای سازند آسماری در میدان آغاجاری و تغییرات ضخامت آنها. مرز بالایی سازند آسماری به گچساران به عنوان خط مبنا در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰ تطابق چینه ای-زمانی در میدان آغاجاری بر اساس خطوط زمانی. مرز بالایی سازند آسماری به گچساران به عنوان خط مبنا در نظر گرفته شده است.

مرز پایینی آن، یک مرز سکانسی (Pb-4000)، درون سازند پابده قرار دارد که بر روی نمودار گاما و INPEFA قابل تشخیص می‌باشد (شکل‌های ۵ و ۸). زون‌های زیستی A و B در این واحد گسترش دارند بنابراین سن آن روپلین-شاتین می‌باشد. روند افزایشی رو به بالا یعنی روند مثبت در نمودار INPEFA، که بیانگر پیشروی دریا است شامل رخساره‌های رو به بالا عمیق شونده (رخساره‌های رمپ بیرونی Fa.1 و Fa.2) مربوط به بخش بالایی سازند پابده است که متشکل از شیل با فراوانی روزنداران پلانکتون (زون زیستی A) می‌باشد. نقطه برگشت منفی منطبق بر راس سازند پابده (Nb-5000) و بیانگر حداکثر سطح پیشروی دریاست. روند کاهشی نمودار یعنی روند منفی که معرف پسروی دریا می‌باشد و شامل بخش قاعده سازند آسماری متشکل از تناوب سنگ آهک، مارن و شیل و گاهی ماسه سنگ زون تدریجی می‌باشد و رخساره‌های آن با روند کم عمق شونده به سمت بالا (Fa.1، Fa.2، Fa.3 و Fa.6) مربوط به انتهای رمپ میانی و مرز رمپ بیرونی و میانی می‌باشند. محتوای زیستی این واحد نشان دهنده تمرکز بالایی از مجموعه فسیلی روزنداران بزرگ شامل Lepidocyclina، Nephrolepidina، Oper-culina، Ditrupa است (شکل۸). چارت تطابق چینه‌ای میدان، کاهش تدریجی ضخامت واحد چینه‌ای شماره ۱ به سمت ساختار بلندای دیرینه هندیجان را نشان می‌دهد (شکل‌های ۹ و ۱۰).

واحد چینه‌ای۲: ترکیب سنگ‌شناسی این واحد عمدتا کربناته است، اما در غرب میدان، ماسه سنگ‌های ریزدانه در زمینه گل میکرایتی (Fa.12) و نیز رخساره وکستون با فسیل‌های نومولیتیده و لپیدوسیکلینینده حاوی دانه‌های زیاد ماسه (Fa.5) به‌صورت لایه‌هایی با حداکثر ضخامت ۱۵ m نیز در آن گسترش دارند. مرز پایینی واحد (Pb-3000) در بالا توضیح داده شد ولی مرز بالایی آن (Pb-2000) منطبق بر مرز سکانسی بسیار مهم الیگوسن-میوسن می‌باشد که پایین افتادگی شدید سطح آب دریا در مقیاس جهانی را در پی داشته است. در فروافتادگی دزفول این رخداد با شواهدی از خروج از آب پلتفرم کربناته آسماری و نیز جدا شدن مرکز حوضه آسماری از دریای آزاد همراه بوده است به نحوی که منجر به نهشته شدن انیدریت قاعده‌ای در مرکز حوضه (میدان نفتی پارسی) شده است [۷]. سن این واحد شاتین بوده و حاوی زون‌های زیستی C و D می‌باشد. الگوی خاص نمودار INPEFA با مقدار گامای تقریبا ثابت و یکنواخت در این واحد، معرف الگوی انباشتگی از نوع تجمعی[۱] است که بیانگر تجمع زیاد رخساره‌های مرجانی-جلبک قرمز می‌باشد. محتوای زیستی این واحد عمدتا شامل مرجان، جلبک قرمز، بریوزوآ و به مقدار کمتر نئوروتالیا و هترستژینا می‌باشد که به سمت بالاتر، روزنداران بنتیک مانند آرکیاس غالب می‌شوند بنابراین رخساره‌های غالب رسوبی در این واحد شامل رخساره جلبک قرمز-مرجانی (Fa.6 و Fa.7) است که به سمت بالا به رخساره‌های بنتیک (Fa.9 ،Fa.10) تبدیل می‌شوند. (شکل۸). با توجه به تجمع اجزای اسکلتی سازنده این واحد (جلبک قرمز و مرجان) و انطباق آن با رخنمون‌های مجاور(مانند کوه خویز، تنگ گورگدا، کوه رازی و کوه خامی)، که توسط ون بوخم و همکاران [۷] و شب افروز و همکاران [۸] گزارش شده‌اند می‌توان وجود ساختمان‌های مرجانی[۲] را برای این واحد چینه‌ای نیز متصور بود. کاهش تدریجی ضخامت این واحد نیز به سمت ساختار بلندای دیرینه هندیجان در چارت تطابق چینه‌ای میدان قابل مشاهده می‌باشد (شکل‌های ۹ و۱۰).

واحد چینه‌ای۳: ترکیب سنگ شناسی این سکانس شامل کربنات با لایه‌های نازک سیلیسی-آواری است. مرز پایینی این واحد (Pb-2000) در بالا توضیح داده شد اما مرز بالایی آن (Pb-1000) منطبق بر مرز سکانسی بین آشکوب‌های آکی‌تانین و بوردیگالین می‌باشد (شکل‌های ۵ و ۸). بنابراین سن این واحد آکی‌تانین و حاوی زون‌های زیستی E و F می‌باشد. این واحد عمدتا متشکل از رخساره‌های رمپ داخلی و پشته کم عمق (Fa.8 تا Fa.12) با

1. Aggradational Stacking Pattern
2. Coral Buildup

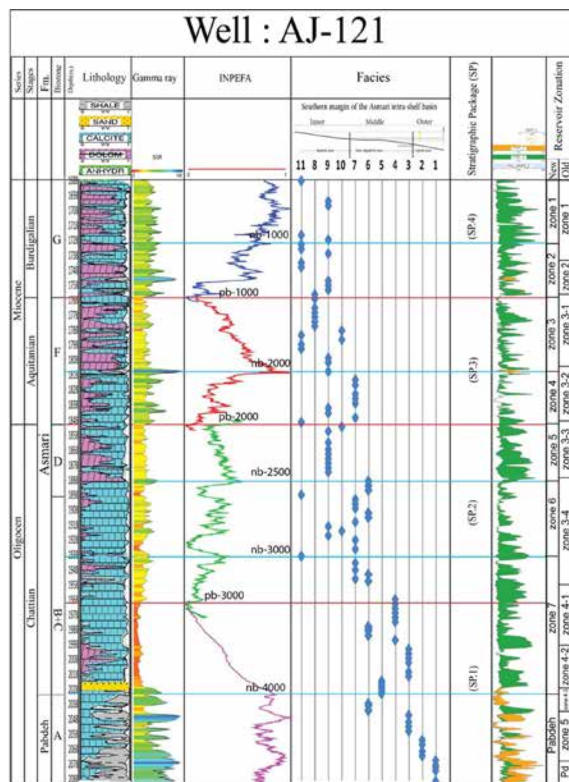
فراوانی روزنداران پرسلانوز است (شکل۸). در چارت تطابق چینه‌ای میدان، کاهش تدریجی ضخامت به سمت ساختار بلندای دیرینه هندیجان در این واحد نیز دیده می‌دهد (شکل‌های ۹ و ۱۰).

واحد چینه‌ای ۴: این واحد معرف بالاترین قسمت سازند آسماری است که شامل کربنات و اندکی رخساره‌های سیلیسی آواری است. رخساره سیلیسی آواری (Fa.12)، شامل ماسه سنگ ریزدانه در زمینه گل میکرایتی است که معمولا حاوی نودول‌های انیدریتی بوده و همراه با سایر رخساره‌های کم عمق رمپ داخلی (Fa.10 ،Fa.11) دیده می‌شود (جدول۳ و شکل ۷). مرز پایینی این واحد (Pb-1000) در بالا توضیح داده شده است اما مرز بالایی آن در زیر اولین انیدریت پوش سنگ گچساران قرار دارد این واحد بیشتر از رخساره‌های مردابی رمپ داخلی (Fa. 8 تا Fa.12) تشکیل شده است که در شرایط کم انرژی و کم عمق دریایی نهشته شده‌اند. زون زیستی G با فراوانی روزنداران پرسلانوز از قبیل بورلیس مشخص می‌شود، بنابراین سن بوردیگالین دارد. این واحد نیز کاهش تدریجی ضخامت به سمت بلندای دیرینه هندیجان را نشان می‌دهد (شکل‌های ۹ و ۱۰).

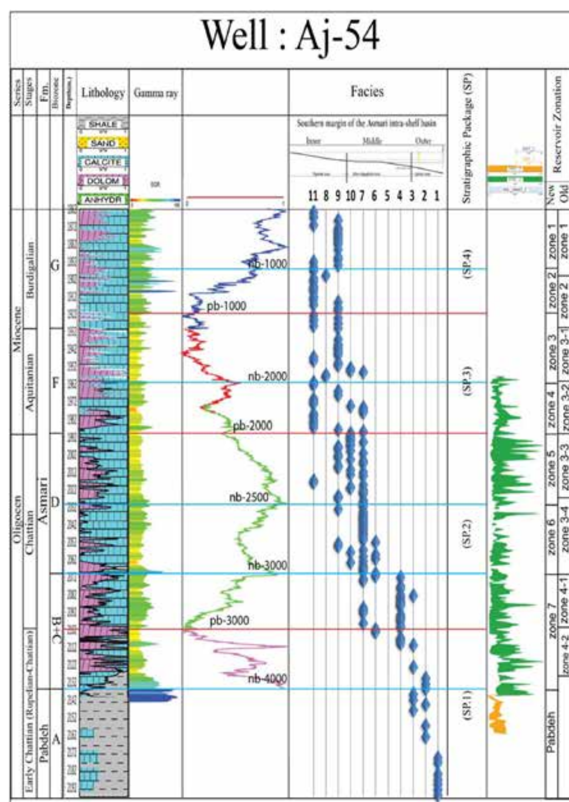
بحث و نتایج

در این مطالعه، از چارچوب زمانی متشکل از ۴ مرز زمانی (Pb) و ۵ مرز زمانی (Nb) (جدول۱) در تطابق چینه‌ای سازند آسماری در کل میدان، بررسی تغییرات ضخامت واحدهای چینه‌ای-رسوبی و همچنین بررسی زون‌های مخزنی و ارائه زون‌بندی مخزنی جدید آسماری استفاده گردید (شکل‌های ۱۰ تا ۱۲). استفاده از این چارچوب زمانی دقیق در این مطالعه با هدف کنترل زون بندی مخزن نتایج متعددی در پی داشت. اولین نتیجه به‌دست آمده استفاده از مرزهای زمانی در بازنگری سرسازند پابده در میدان آغاجاری است. همان‌طور که قبلا ذکر گردید زون‌بندی قبلی مخزن با دیدگاه لیتواستراتیگرافیک صورت گرفته است و بنابراین راس سازند پابده نیز با همین دیدگاه لیتواستراتیگرافیک تعیین شده است. از طرفی با توجه به تدریجی و دو زمانه بودن[1] سازند پابده، مرز سازندهای آسماری و پابده [۵، ۷، ۲۳] و سن سازند پابده به سمت مرکز حوضه جوان‌تر می‌شود بنابراین در این مطالعه با تطابق ناحیه‌ای داده‌های میدان گچساران [۸ و ۹] (نزدیک به خط ساحلی اینتراشلف آسماری) و میدان منصورآباد، مرز زمانی Nb-4000 به عنوان مرز سازندهای آسماری و پابده انتخاب گردید (شکل ۱۰). در زون‌بندی قبلی، مرز زون‌های مخزنی در چاه‌های مختلف نسبت به چاه نمونه ۱۲۱، گاهی تا m ۱۰ نیز با هم اختلاف داشتند این مقدار خطا در زون‌بندی بسیار مهم و قابل توجه است و به خصوص در زون‌های با کیفیت مخزنی بالا مانند زون‌های ۱ و ۳ باعث ایجاد خطاهای بزرگ در بخش مدل‌سازی خواص پتروفیزیکی مخزن[2] و نهایتا در حجم سنجی مخزن خواهد شد. در این مطالعه به کمک مرزهای زمانی در قالب نرم‌افزار سیکلولاگ، مرز زون‌های مخزنی با دقت بیشتری تعیین گردید. همان‌گونه که قبلا نیز گفته شد تاثیر وجود بلندای دیرینه هندیجان باعث کاهش ضخامت واحدهای چینه‌ای در بخش شرقی میدان آغاجاری شده است این اتفاق باعث ایجاد پیچیدگی‌های ساختمانی و تغییر الگوی هندسه رسوبات شده است که اشکالات و ابهاماتی در زون‌بندی مخزن آسماری در این بخش از میدان را در پی داشته است به‌طوری که در زون‌بندی قبلی، در چاه‌های شرق میدان، تعدادی از زون‌های مخزنی، به‌خصوص زون‌های ۳ و ۴ (همراه با زیرزون‌های آنها) مرزهای زمانی را قطع می‌کردند که در این مطالعه، مرز زون‌های مذکور با مرزهای زمانی انطباق داده شد و این ایرادات و ابهامات رفع گردید و در نهایت با توجه به مرزهای زمانی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و کیفیت مخزنی زون‌بندی جدید پیشنهاد شد.

1. Diachronus
2. Property Modeling



شکل ۱۱ استفاده از خطوط زمانی در زون‌بندی و ارائه زون‌بندی مخزن جدید در چاه نمونه ۱۲۱ آغاجاری



شکل ۱۲ استفاده از خطوط زمانی در زون بندی و ارائه زون بندی مخزن جدید در چاه¬ نمونه ۵۴ آغاجاری.

در زون‌بندی جدید، همبستگی خوبی بین زون‌ها و ویژگی‌های زمین شناسی و کیفیت مخزنی مشاهده گردید که در چاه‌های نمونه ۱۲۱ و ۵۴ نشان داده شده است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). مطابق انتظار، زون‌های مخزنی که زیر مرزهای زمانی (Pb) (زیر مرزهای سکانسی) قرار می‌گیرند از کیفیت مخزنی بهتری برخوردار هستند. همچنین به دلیل فراوانی و تمرکز اجزای سازنده ساختمان‌های مرجانی در واحد چینه‌ای ۲ با سن شاتین، کیفیت مخزنی نسبتا خوب و یکنواختی در زون‌های مخزنی این واحد چینه‌ای مشاهده می‌گردد.

نتیجه‌گیری

۱- با استفاده از نرم‌افزار سیکلولاگ، چارچوب زمانی دقیقی متشکل از ۴ مرز Pb و ۵ مرز Nb ساخته شد و در چاه‌های مورد مطالعه اعمال گردید.

۲- تجزیه و تحلیل رخساره منجر به شناسایی ۱۲ رخساره شد که در چهار گروه رخساره‌ای رمپ داخلی، رخساره رمپ میانی، شول و رخساره رمپ بیرونی طبقه‌بندی شدند.

۳- با تلفیق داده‌های رسوبی و چینه‌ای در چارچوب زمانی تهیه شده، تعداد چهار بسته (واحد) چینه‌ای در سازند آسماری شناسایی گردید.

۴- ضخامت واحدهای چینه‌ای، به طور قابل توجهی از غرب به سمت شرق میدان تغییر کرده و نازک‌تر می‌شوند که متاثر از وجود بلندای دیرینه هندیجان در زمان رسوبگذاری آسماری می‌باشد. این کاهش ضخامت با ایجاد پیچیدگی‌های ساختمانی و تغییر در الگوی هندسه رسوبات، موجب بروز ابهامات و دشواری‌هایی در تطابق چینه‌ای و زون‌بندی مخزن آسماری در بخش شرقی میدان شده است.

۵- با استفاده از چارچوب زمانی دقیق، ضمن بازنگری در تعیین مرز سازندهای آسماری و پابده، مرز زون‌های مخزنی با دقت بیشتری تفکیک گشته و زون‌بندی جدیدی ارائه گردید.

۶- زون‌بندی مخزنی جدیدی با ۷ زون مخزنی پیشنهاد گردید که با لحاظ نمودن ویژگی‌های زمین‌شناسی و کیفیت مخزنی، تطابق خوبی بین مرز زون‌های مخزنی و مرزهای زمانی در آن مشاهده می‌شود و استفاده از آن باعث رفع ابهامات زون‌بندی در بخش شرقی میدان شد.

۷- در زون‌بندی جدید، مطابق انتظار زون‌های مخزنی با کیفیت مخزنی بهتر در زیر مرزهای زمانی منطبق بر مرزهای سکانسی قرار دارند. همچنین واحد چینه‌ای شماره ۲ با سن شاتین به دلیل نوع اجزای سازنده که تمرکز بالایی از مرجان‌ها را شامل می‌شود کیفیت مخزنی نسبتا خوب و یکنواختی در همه چاه‌ها دارند.

تشکر و قدردانی

نگارندگان برخود لازم می‌دانند ازحمایت شرکت‌ملی‌مناطق نفتخیز جنوب برای انجام این پژوهش تشکر نمایند. همچنین از سردبیر محترم و داوران علمی مجله کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

[1]. Sherkati S Letouzey J (2004) Variation of structural style and basin evolution in the Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Marine and Petroleum Geology, 21:535 – 554, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.01.007.
[2]. Abdollahie Fard I, Braathen A, Mokhtari M, Alavi SA (2006) Interaction of the Zagros fold-thrust belt and the Arabian type, deep-seated folds in the Arabian Plain and the Dezful Embayment, SW Iran. Pet Geosci, 12, 3:4 7 – 62, doi.org/10.1144/1354-079305-706.
[3]. Farahzadi E, Alavi SA, Sherkati S, Ghasemi M.R (2019) Variation of subsidence in the Dezful Embayment, SW Iran: Influence of reactivated basement structures, Arabian Journal Geosci. 12, 616: doi.org/10.1007/s12517-019-4758-5.
[4]. Embry A (2009) Practical Sequence Stratigraphy, Canadian Society of Petroleum Geologists' monthly magazine, The Reservoir, between May 2008 and September 2009.
[5]. Ehrenberg S N, Pickard N A H, Laursen G V, Monibi S, Mossadegh Z K, Svånå T A, Aqrawi A A M, McArthur J M, Thirlwall M F (2007) Strontium isotope stratigraphy of the Asmari Formation (Oligocene–lower

Miocene), SW Iran, Journal of Petroleum Geology, 30(2): 107–128, doi.org/10.1111/j.1747-5457.2007.00107.x.
[6]. Laursen G V, Monibi S, Allan T L, Pickard N A, Hosseiney A, Vincent B, Hamon Y, Buchem, F S P V, Moallemi A, Druillion G (2009) In: The Asmari Formation revisited: changed stratigraphic allocation and new biozonation, First International Petroleum Conference and Exhibition, Shiraz, Iran, dx.doi.org/10.3997/2214-4609.20145919.
[7]. Van Buchem FSP, Allan TL, Laursen GV, Lotfpour M, Moallemi A, Monibi S, Motiei H, Pickard NAH, Tahmasbi AR, Vedrenne V, Vincent B (2010) Regional stratigraphic architecture and reservoir types of the Oligo–Miocene deposits in the Dezful Embayment (Asmari and Pabdeh Formations) SW Iran, Geological Society, London, Special Publications, 329(1): 219–263, doi:10.1144/sp329.10.
[8]. Shabafrooz R, Mahboubi A, Vaziri-Moghaddam H, Moussavi-Harami R, Ghabeishavi A, Al-Asam S, I (2015) Facies analysis and carbonate ramp evolution of Oligo-Miocene Asmari formation in the Gachsaran and Bibi-Hakimeh oil fields and the nearby Mish Anticline, Zagros Basin, Iran: Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen, 276(1): 121–146.
[9]. Shabafrooz R, Mahboubi A, Vaziri Moghaddam H, Ghabeishavi A, Moussavi Harami R (2015) Depositional architecture and sequence stratigraphy of the Oligo–Miocene Asmari platform, Southeastern Izeh Zone, Zagros Basin, Iran: Facies, 61, doi: 10.1007/s10347-014-0423-3.
[10]. Allahkarampour Dill M, Vaziri-Moghaddam H, Seyrafian A, Behdad A (2018) Oligo-Miocene carbonate platform evolution in the northern margin of the Asmari intra-shelf basin, SW Iran, Marine and Petroleum Geology, 92, 437-461, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.11.008.
[11]. Daraei M, Bayet-Goll A, Ansari M (2017) An integrated reservoir zonation in sequence stratigraphic framework: a case from the Dezful Embayment, Zagros, IranJournal of Petroleum Science and Engineering, doi.org/10.1016/j.petrol.2017.04.038.
[12]. Agard P, Omrani, J, Jolivet L, Whitechurch, B, Spakman, W, Monie, E, Meyer, B, Wortel, R (2011) Zagros orogeny: a subduction-dominated process. Geological Magazine 148, 692e725, In: Allen, M.B., Budd, G.E., Leat, P.T., Whitham, A.G. (Eds.), Geodynamic Evolution of the Zagros, Cambridge University Press, doi.org/10.1017/S001675681100046X.
[13]. Sepehr M, Cosgrove J W (2002) The major fault zones controlling the sedimentation, deformation, and entrapment of hydrocarbon in the Zagros fold-thrust belt, Iran, AAPG Annual Meeting: Houston, Texas, 10-13.
[14]. Sepehr M, Cosgrove J W (2004) Structural framework of the Zagros fold-thrust belt, Iran, Marine and Petroleum Geology, 21:829 – 843, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.07.006.
[15]. Karimnejad Lalami H, Hajialibeigi H, Shahram Sherkati Sh, Mohammad Hossein Adabi M H (2020) Tectonic evolution of the Zagros foreland basin since Early Cretaceous, SW Iran: Regional tectonic implications from subsidence analysis, Journal of Asian Earth Sciences, 204: 104550, doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104550.
[16]. Allahkarampour Dill M, Vaziri-Moghaddam H, Seyrafian A, Behdad A, Shabafrooz R (2020) A review of the Oligo–Miocene larger benthic foraminifera in the Zagros basin, 3 Iran; New insights into biozonation and palaeogeographical maps, Revue de micropaléontologie 66 (2020) 100408, doi.org/10.1016/j.revmic.2020.100408.
[17]. Fathi isvand R, Mussavi-Harami R, Mahboobi A, Behdad A (2022) Facies analysis and carbonate platform evolution of the Oligo-Miocene deposits in the Aghajari and Rag-e-Safid oil fields, Dezful Embayment, SW Iran. Journal of African Earth Sciences, doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104514.
[18]. Dunham R J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture, In: Ham, W.E. (Eds.), Classification of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, 108-121.
[19]. Embry A F, Klovan J E (1971) A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT, Bulletin of Canadian Petroleum Geology 19, 730-781, doi.org/10.35767/gscpgbull.19.4.730.
[20]. Nio S, Djin Brouwer J, Smith D G, Jong M De, Böhm A (2005) Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs, First Break, 23: 4, doi.org/10.3997/1365-2397.23.4.26503.
[21]. De Jong M, Smith D, Djin Nio S, Hardy N (2006) Subsurface correlation of the Triassic of the UK southern central graben: new look at an old problem, 24: 9.
[22]. De Jong M, Nio S D, Smith D, Böhm A R (2007) Subsurface correlation in the Upper Carboniferous (Westphalian) of the Anglo-Dutch Basin using the climate stratigraphic approach, first break, 25: 12, doi.org/10.3997/1365-2397.2007029.
[23]. Thomas A N (1948) The Asmari Limestone of southwest Iran. NGLO -Iranian Oil Company Report, 706. Unpublished.
[24]. Wynd J G (1965) Biofacies of the Iranian consortium- agreement area, Unpublished Report 1082: Iranian Offshore Oil Company, Tehran, 7: 2.
[25]. Adams C, Bourgeois E (1967) Asmari biostratigraphy, Geological and Exploration Div. Iranian Oil Offshore Company. Report 1074: Unpublished, 5: 4.
[۲۶]. مدیریت اکتشاف نفت تهران، ۱۳۸۰، نقشه ساختارهای زاگرس.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۴۷-۱۳۶

بررسی غلظت و منشا ترکیبات هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) در رسوبات سطحی نوار ساحلی خلیج فارس، در محدوده حاکمیت بندر بوشهر

بهمن کیانی شاهوندی، علی مقیمی کندلوس*، مژگان صلواتی و سعید حکیمی آسیابر

گروه زمین‌شناسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

چکیده

آلودگی اکوسیستم‌های آبی به هیدروکربن‌های نفتی یکی از مهم‌ترین مباحثی است که در سال‌های اخیر چالش برانگیز شده است. بندر بوشهر واقع در استان بوشهر در جنوب ایران به واسطه ارتباط با خلیج فارس و داشتن سواحل طویل یکی از نقاط مستعد آلودگی‌های مرتبط با ترکیبات هیدروکربنی می‌باشد. به منظور بررسی غلظت ترکیبات آروماتیک رسوبات سطحی ساحل بندر بوشهر تعداد ۲۷ نمونه رسوب برداشت گردیده و مورد آنالیز GC قرار گرفته است. مقدار کل ترکیبات آروماتیک در رسوبات ساحلی بندر بوشهر بین ۲۰۶ تا ۱۴۶۳ ng/g در نوسان می‌باشد. بیشترین حجم ترکیبات آروماتیک در نوار شمالی ساحل و میانه ساحل متمرکز است و در نوار جنوبی ساحل نیز غلظت ترکیبات کم می‌باشد. این ترکیبات دارای منشأ پایروژنیک و پتروژنیک می‌باشند هرچند سهم منشأ پتروژنیک بیشتر می‌باشد. منشأ ترکیبات احتراق حاصل حمل و نقل دریایی و زمینی، فاضلاب‌های شهری و خانگی و جریان‌های فراساحل حامل ترکیبات نفتی نشأت گرفته از میادین نفتی خلیج فارس می‌باشد. بر مبنای استانداردهای آلودگی قسمت‌های شمالی و میانی نوار ساحلی خلیج فارس در محدوده بندر بوشهر نسبت به ترکیبات آروماتیک دارای بارآلودگی متوسط و در قسمت‌های جنوبی بار آلودگی کم می‌باشد.

کلمات کلیدی: ترکیبات آروماتیک، رسوب، ساحل خلیج فارس، بوشهر، ایران.

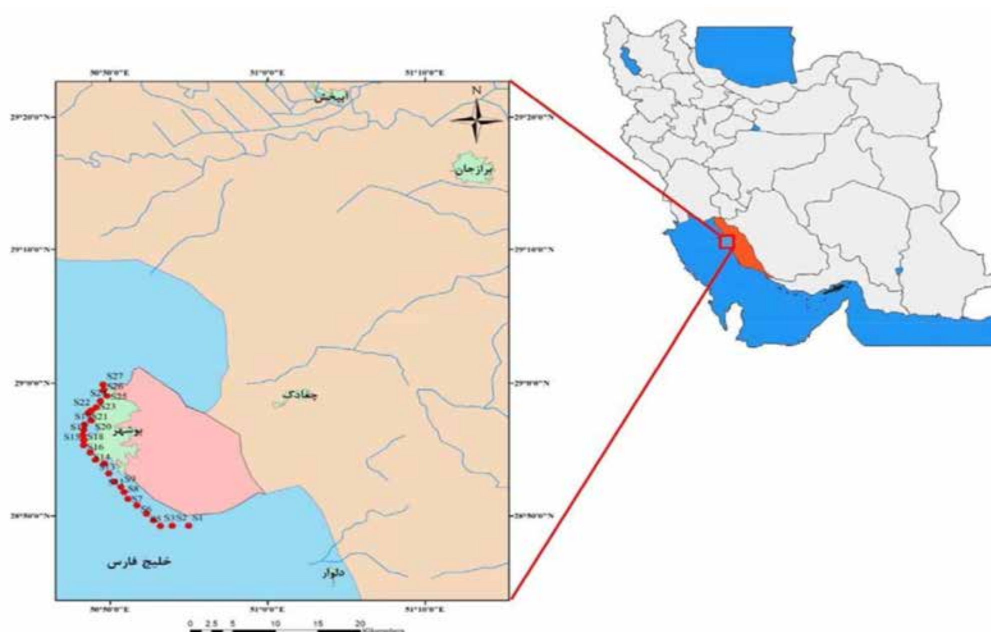
مقدمه

توسعه روز افزون صنعت اگرچه مزایای بی شماری را به همراه دارد ولی متأسفانه مشکلات خاصی همچون آلودگی محیط زیست را به دنبال دارد.آلودگی اکوسیستم‌های آبی به هیدروکربن‌های نفتی یکی از مهم‌ترین مباحثی است که در سال‌های اخیر به آن توجه زیادی شده است و مطالعات متعددی در این زمینه صورت گرفته است [۱-۴] زیرا این اکوسیستم‌ها به طور نهایی دریافت

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی mah.nazari_sarem@iauctb.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.4981.3223)

کننده هیدروکربن‌های نفتی هستند. ترکیبات آلی در نفت با توجه به ماهیت سمی و تجمعی خود می‌توانند تأثیرات بسیار مخربی در حیات و سلامت گونه‌های جانوری و گیاهی دریا داشته باشند [۵]. ترکیبات نفتی با تجمع در بافت‌های چربی و عضلانی بدن آبزیان، سبب آلودگی گونه‌های آبزی مورد استفاده انسان خواهند شد [۶]. ورود ترکیبات نفتی به شبکه غذایی انسان از طریق این آبزیان، انواع مسمومیت‌ها و بیماری‌ها را برای انسان به دنبال خواهد داشت [۷-۸]. هیدروکربن‌های نفتی بعد از ورود به دریا تحت تأثیر تغییرات گسترده فیزیکی و شیمیایی انحلال، انتقال، پخش، تبخیر، هوازدگی، امولسیون، اکسیداسیون، رسوب‌گذاری و فعالیت‌های میکروبی قرار می‌گیرند [۹]. استان بوشهر در جنوب کشور ایران یکی از استان‌های مهم مرتبط با صنعت نفت است که دارای مرز آبی با خلیج فارس می‌باشد. اهمیت و ارزش اصلی خلیج فارس به خاطر وجود منابع سرشار نفت در این منطقه است که روز به روز بر اهمیت این منطقه میافزاید [۱۰]. بندر بوشهر واقع در استان بوشهر در جنوب ایران (شکل ۱).

به واسطه ارتباط با خلیج فارس و داشتن سواحل طویل یکی از نقاط مستعد آلودگی‌های مرتبط با ترکیبات هیدروکربنی و فلزات سنگین به شمار می‌رود. نوع ساختار رسوبات مکانی مناسب برای تجمع انواع آلاینده‌های آلی، به ویژه هیدروکربن‌های نفتی است [۱۱]. در سال‌های اخیر، مسأله افزایش آلودگی توده‌های آب و نواحی مجاور خط ساحلی به دلیل ریزش نفت مورد توجه بوده است [۱۲]. رتعدد زیاد میادین و تأسیسات نفتی و فعالیت‌های صنعتی که به ساحل بندر بوشهر ختم می‌شوند، باعث شده است تا اکوسیستم ساحل این بندر در خطر آلودگی‌های مرتبط با ترکیبات هیدروکربنی قرار بگیرد. لزوم توسعه سواحل از یک سو و برنامه‌ریزی مدون برای تبدیل سواحل ایران به مرکز ژئوتوریسم ساحلی سبب شده است که پایش‌های زیست محیطی سواحل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. از این رو هدف از این تحقیق، بررسی غلظت هیدروکربن‌های نفتی رسوبات ساحلی در محدوده بندر بوشهر می‌باشد. بی شک نتایج این پژوهش منجر به پهنه‌بندی درست این ساحل از منظر تغییرات غلظت هیدروکربن‌های نفتی شده و کمک‌های زیادی به مدیریت زیست محیطی این اکوسیستم می‌نماید.



شکل ۱ موقعیت بندر بوشهر و نمونه‌های برداشت شده از خط ساحلی بندر بوشهر.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۴۶-۱۳۵

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

نمونه‌برداری در ساحل بندر بوشهر به صورت سیستماتیک صورت گرفت. در این روش تعداد ۲۷ ایستگاه به فاصله ۱ Km از هم مشخص گردید (شکل ۱). در بعضی ایستگاه‌ها به دلیل ظاهری ساحل این فاصله کم و گاهی زیاد شده است. نمونه‌برداری در نوار ساحلی در هنگام جزر صورت گرفت. عملیات نمونه‌برداری از رسوبات سطحی ساحل (۰ تا ۱۰ cm) انجام گرفت [۱۳-۱۴]. در این عملیات نمونه‌برداری، برای برداشت نمونه، از بیلچه پلاستیکی استفاده شد. در هر ایستگاه نمونه‌برداری، نمونه‌های رسوبات سطحی از ۵ نقطه مجزا به فاصله ۱۰ m از یکدیگر و در چهار رأس و مرکز یک لوزی صورت گرفت. مشابه این روش نمونه‌برداری در پژوهش حسینی بیزکی و همکاران [۱۵]. صورت گرفت. رسوبات پس از نمونه‌برداری در درون ورق آلومینیومی قرار داده شده و پس از بسته‌بندی درون محفظه پر از یخ قرار داده شده است و تا زمان آنالیز در دمای منفی ۲۰ °C نگهداری می‌شود [۱۶]. در هر ایستگاه ۵ نمونه برداشت شده بود که قبل از انجام آنالیزها این ۵ نمونه باهم مخلوط شده و یک نمونه از هر ایستگاه برای آنالیز آماده می‌شود. علت این مهم کاهش خطا و افزایش دقت خوانش آنالیزها می‌باشد.

آنالیز ژئوشیمیایی

پس از مخلوط کردن نمونه‌های مربوط به هر ایستگاه، جهت خشک کردن نمونه‌های جمع‌آوری شده، مقدار ۲۰۰ g از نمونه‌ها در دستگاه فریز درایر در دمای منفی ۶۰ °C به مدت ۷۲ h قرار گرفته و سپس هموژنیزه شدند. پس از آن، نمونه‌های خشک شده توسط پودر چینی پودر شده و از غربال ۶۳ µ عبور داده شدند. مقدار ۵ g از هر نمونه با ۱۰۰ ml حلال دی کلرومتان مخلوط شدند و جهت استخراج مواد آلی آن به مدت ۱۰ h در دستگاه ساکسوله قرار گرفتند. به مواد آلی استخراجی، جهت گوگردزدایی، ۳ g مس فعال به ظروف حاوی نمونه‌ها اضافه گردید و از کاغذ فیلتری عبور داده شد تا محتویات گوگرد از ترکیب خارج گردد. حلال‌های آلی استفاده شده در فرایند ساکسوله، توسط دستگاه حلال پران چرخشی و جریان ملایم گاز نیتروژن حذف گردیدند. مواد آلی استخراج شده از نمونه‌ها، طی دو مرحله توسط ستون‌های کروماتوگرافی شیشه‌ای عبور داده شدند. در طول ستون اول، ترکیبات غیرقطبی نظیر آلکان‌ها، آروماتیک‌های چندحلقه‌ای، آلکیل بنزن سولفونیت‌ها و هوپان‌ها توسط ۲۰ m ترکیب مخلوطی از دی کلرومتان و هگزان، با نسبت ۱ به ۳، جدا شدند. فاز ثابت سیلیکاژل ۵٪ غیرفعال شده با آب بود. نمونه‌ها توسط دستگاه حلال پران چرخشی و همچنین جریان ملایم گاز نیتروژن به ۲- m ۱ غلیظ شدند. درنهایت آلکان‌های نرمال با استفاده از سیلیکاژل فعال به عنوان فاز ثابت و ۴ m هگزان نرمال به عنوان فاز متحرک جداسازی گردید. آلکان نرمال غلیظ شده با جریان ملایم گاز نیتروژن خشک شده و آماده برای تزریق به دستگاه کروماتوگرافی گازی- طیف سنج جرمی گردیدند. ۱ µl از آلکان‌های نرمال جدا شده از نمونه‌ها به دستگاه کروماتوگرافی گازی- طیف سنج جرمی تزریق شدند.گاز حامل در ستون دستگاه، نیتروژن با نرخ تزریق ۱/۵ m/min بوده است. دمای اولیه آون ۶۰ °C بوده است که برای ۲ min نیز ثابت نگه داشته شد و پس از آن با نرخ افزایش ۸ °C در دقیقه تا دمای ۳۰۰ °C افزایش یافت و به مدت ۲۰ min هم در این دما نگه داشته شد. این آنالیز در آزمایشگاه نوین شیمیار صورت گرفت.

بحث و نتایج

در بین آلاینده‌های آلی، هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی به‌دلیل خواص شیمیایی و اثرات بیولوژیک ویژه، بیش از سایرین مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند [۱۸-۱۷]. هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ایی، ترکیبات معطری هستند که دارای دو یا

چند حلقه بنزنی می‌باشند. این ترکیبات در زمان تخریب دمایی، مولکول‌های آلی و ترکیبات مشابه آنها تشکیل می‌شوند [۱۹ و ۲۰]. پارامترهای آماری غلظت ترکیبات آروماتیک نمونه‌ای مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. از بین ۱۶ ترکیب آروماتیک مرسوم ترکیب دی بنزو آنتراسن و ایندیوپایرن که از آروماتیک‌های سنگین می‌باشند در نمونه‌های مورد مطالعه گزارش نشده‌اند. بر مبنای جدول ۱ بیشترین میانگین غلظت به ترتیب متعلق به نفتالن، آسنفتن، آسنفتیلن، فنانترن، پایرن، آنتراسن، فلورانتن، بنزو-آنتراسن، بنزوپایرن، بنزو پریلن، بنزوفلورانسن، کرایسن و بنزوفلورانتن می‌باشد. مقدار کل ترکیبات آروماتیک در رسوبات ساحلی بندر بوشهر بین ng/g ۲۰۶ تا ۱۴۶۳ در نوسان می‌باشد.

جدول ۱ پارامترهای آماری ترکیبات آروماتیک (µg/g) در نمونه‌های رسوبات سطحی خط ساحلی بندر بوشهر.

ترکیب	نفتالن	آسنفتیلن	آسنفتن	فلورن	فنانترن	آنتراسن	فلورانتن
حلقه	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۴
بیشینه	۱۲۹۳/۲۵	۱۶۹/۳	۱۹۳/۶	۴۱/۱۲	۹۸/۳	۵۰/۷	۷۶/۱
کمینه	۵۲/۶۳	۱۲/۸۵	۱۶/۸	۵/۹۷	۳/۰۷	۵/۳	۲/۶
میانگین	۴۲۵/۹	۱۰۴/۸	۱۲۰	۲۴/۶۷	۴۱	۲۶/۲۳	۱۵/۶۲
انحراف معیار	۳۱۵/۶	۳۹/۶	۵۳/۵۴	۱۰/۶	۲۱/۹	۸/۵۳	۱۵
ضریب تغییرات	۱/۳۵	۲/۶۶	۲/۴۲	۲/۳۲	۱/۸۷	۳/۰۸	۱/۰۴
حد بحرانی	-	۴۴	۱۶	۱۹	۲۴۰	۸۵/۳	۶۰۰
ترکیب	پایرن	بنزو (a) آنتراسن	کرایزن	بنزو (b) فلورانتن	بنزو (k) فلورانتن	بنزو (a) پایرن	بنزو (ghi) پریلن
حلقه	۴	۴	۴	۴	۵	۵	۶
بیشینه	۵۵/۶۳۸	۱۵/۷	۱۵/۳	۹/۲	۸/۶	۱۰/۳	۱۲/۹۷
کمینه	۳/۳۳	۱۳/۲	۱/۸	۸/۳	۷/۳	۸/۲	¾
میانگین	۲۸	۱۴/۵	۸/۰۸	۸/۸	۷/۹	۹/۴۵	۹/۲
انحراف معیار	۱۲/۴۶	۱/۰۲	۳/۹	۳۷	۰/۵۳	۰/۷۶	۲/۴
ضریب تغییرات	۲/۲۴	۱۴/۱۷	۲/۰۵	۲۳/۵	۱۴/۹	۱۲/۲۷	۳/۷۴
حد بحرانی	۶۶۵	۲۶۱	۳۸۴	-	-	۴۳۰	-

عمده ترکیبات آروماتیک این نهشته‌ها آروماتیک‌های سبک می‌باشند و غلظت آروماتیک‌های سنگین در این نهشته‌ها کم می‌باشد. بیشترین حجم ترکیبات آروماتیک در نوارشمالی ساحل متمرکز است. در ایستگاه‌های S ۱۲، S ۱۳ و S ۱۴ نیز غلظت این ترکیبات بالا می‌باشد. در نوار جنوبی ساحل نیز غلظت ترکیبات کم می باشد (شکل ۲). ایستگاه‌های شمالی نوار ساحلی در همجواری جاده و مسیرهای حمل و نقل قایقرانی می‌باشند. از این رو یکی از منشأهای آلودگی این ایستگاه‌ها، آلودگی‌های ناشی از این فعالیت‌ها می‌باشد. از سویی دیگر، این ایستگاه‌ها در جنوب غرب جزیره خارک قرار دارند. در محدوده این ایستگاه‌ها و جزیره خارک میدان نفتی ابوذر واقع شده که دارای ۸۹ حلقه چاه با ظرفیت روزانه تولید ۱۸۵ هزار بشکه نفت می‌باشد و این نفت تولیدی با خط لوله برای تصفیه و صادرات به جزیره منتقل می‌شود [۲۱]. از این رو به نظر می‌رسد در فرآیند بهره‌برداری و انتقال این نفت، غلظت ترکیبات آروماتیک محدوده‌های اطراف دستخوش تغییرگردیده و رسوبات دریا و ساحل خلیج فارس در شمال بندر بوشهر را نیز شامل شده است.



شکل ۲ پراکندگی مجموع ترکیبات آروماتیک (μg/g) در رسوبات سطحی ساحل بوشهر.

تأثیر این میدان و فعالیت‌های مرتبط با آن در آلودگی رسوبات ساحل و دور از ساحل استان بوشهر در پژوهش باطنی و همکاران [۲۱]. نیز تأیید شده است. در محدوده میانی نوار ساحلی نیز غلظت ترکیبات آروماتیک بالا می‌باشد. در این قسمت نیز فاضلاب‌های شهری وارد محدوده ساحل می‌شود. همچنین در km ۶۵ نوار ساحلی میدان گازی گلشن وجود دارد که به نظر می‌رسد فعالیت‌های مرتبط با این میدان نیز بر میزان غلظت ترکیبات آروماتیک تأثیر گذاشته است. جریانات عمقی خلیج فارس بیشترین تأثیر را بر رسوبات منطقه دارند و از سمت فراساحل به سمت ساحل درحرکت هستند از این رو آلودگی‌های میادین نفتی فراساحل را به سمت ساحل هدایت می‌کنند.

آروماتیک‌های سبک مجموع PAHهای با ۲ و ۳ حلقه بنزن است و آروماتیک‌های سنگین مجموع PAHهای با ۴، ۵ و ۶ حلقه بنزن هستند. بیشترین غلظت ترکیبات آروماتیک سبک در نهشته‌های جنوب نوار ساحلی و شمال نوار ساحلی متمرکز می‌باشند (شکل۳) اما ترکیبات سنگین عمدتاً دربخش میانی نوار ساحلی متمرکز شده‌اند و در شمال و جنوب ساحل غلظت این ترکیبات کم می‌باشد (شکل۴).



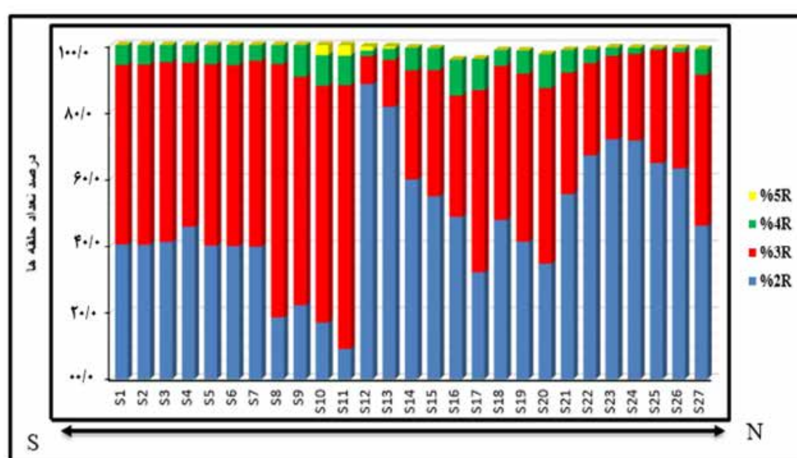
شکل ۳ پراکندگی مجموع ترکیبات آروماتیک سبک (ng/g) در رسوبات سطحی ساحل بوشهر.



شکل ۴ پراکندگی مجموع ترکیبات آروماتیک سنگین (ng/g) در رسوبات سطحی ساحل بوشهر.

بررسی روند تغییرات غلظت ترکیبات آروماتیک در ساحل بوشهر حاکی از وجود منابع آلودگی متفاوت می‌باشد. ایستگاه‌های بخش میانی نوار ساحلی یعنی S ۱۲ تا S ۱۶ در محدوده مرکز شهر، بندرماهیگیری و پارک‌های شهری قرار دارند. به نظر می‌رسد آلودگی این ایستگاه‌ها به دلیل فعالیت‌های حمل و نقل اسکله‌ها و ورود فاضلاب شهری باشد. ایستگاه‌های مرکزی به شدت تحت تاثیر ورود فاضلاب‌های شهری با بار آلی می‌باشند. از سوی دیگر مواد آلی واسطه حرکت ترکیبات آروماتیک‌ها از آب به رسوب می‌باشند [۲۲-۲۳]، لذا غلظت زیاد ترکیبات در این ایستگاه‌ها تحت تأثیر این بار آلی نیز می‌باشد. بخش زیادی از هیدروکربن‌های سنگین در اثر احتراق سوخت ایجاد می‌شوند [۲۳]. از این رو غلظت این ترکیبات در بخش میانی نوار ساحلی و نزدیک به اسکله‌ها که در همجواری با وسایل نقلیه جاده‌ای می‌باشند زیاد هست و در جنوب ساحل که تراکم مراکزشهری و به تبع آن حمل و نقل کمتر است غلظت این ترکیبات کم می‌باشد. Bumard و همکاران [۱۳] طبقه‌بندی برای رسوبات از نظر میزان ترکیبات آروماتیک و آلودگی ارائه نمودند. بر مبنای این تقسیم‌بندی مناطق با غلظت کل ترکیبات آروماتیک کمتر از ۱۰۰ ng/g به عنوان مناطق دارای آلودگی کم، بین ۱۰۰ ng/g تا ۱۱۰۰ دارای بار آلودگی متوسط و مناطق با بیش از ۱۱۰۰ ng/g دارای بار آلودگی بالا می‌باشند [۱۳]. بر مبنای این طبقه‌بندی ایستگاه‌های S12، S13 و S14 در بخش میانی نوار ساحلی و ایستگاه‌های S ۲۳ تا S27 در شمال نوار ساحلی بندر بوشهر از منظر ترکیبات آروماتیک دارای بار آلودگی بالا می‌باشند و سایر ایستگاه‌ها دارای بار آلودگی متوسط می‌باشد. همچنین در بین نمونه‌های مورد مطالعه هیچکدام بار آلودگی پایینی نداشته و این مهم نشان‌دهنده وجود منابع آلاینده در ساحل بندر بوشهر می‌باشد. مقایسه داده‌های غلظت ترکیبات با استاندارد کیفیت رسوب آمریکا نشان داد که میانگین غلظت ترکیبات آسنفتیلن، آسنفتن، فلورن و فنانترن بیش از این استاندارد است و خطر آلودگی این ترکیبات وجود دارد. سایر ترکیبات دارای غلظتی کمتر از این استاندارد می‌باشند و خطر آلودگی کمی دارند. این ترکیبات نامبرده شده در رده ترکیبات غیرسرطان‌زا می‌باشند. ترکیب آروماتیک فنانترن طبق رده‌بندی آژانس محیط‌زیست آمریکا ، جزو آلاینده‌ترین ترکیبات بوده و تماس با آن باعث حساسیت پوست در برابر نور و تا حدّی آلرژی می‌شود [۲۴-۲۵]. ترکیب آسنفتن حاصل احتراق و یک جزء از نفت خام می‌باشد [۲۶]. در مطالعه هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی جهت تعیین منابع وارد کننده آلودگی به محیط زیست از محاسبه برخی ترکیبات PAHs نسبت به هم استفاده می‌شود که به عنوان نسبت‌های مولکولی PAHs شناخته می شوند [۲۷-۲۸].

درصد غلظت هیدروکربن‌ها بر مبنای تعداد حلقه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. آروماتیک‌های ۳ حلقه‌ای و ۲ حلقه‌ای، بیشترین غلظت و بعد از آن آروماتیک‌های ۴ حلقه‌ای بیشترین غلظت را به خود اختصاص داده‌اند. از سویی دیگر کمترین غلظت را آروماتیک‌های ۵ حلقه‌ای به خود اختصاص داده‌اند و آروماتیک‌های ۶ حلقه‌ای نیز در نهشته‌ها وجود نداشته است. نسبت فراوانی آروماتیک‌های ۲-۳ حلقه‌ای به ۴-۶ حلقه‌ای برای شناسایی منابع پتروژنیک و پیروژنیک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹]. بر مبنای این نسبت منشأ این ترکیبات عموما نفتی می‌باشد.

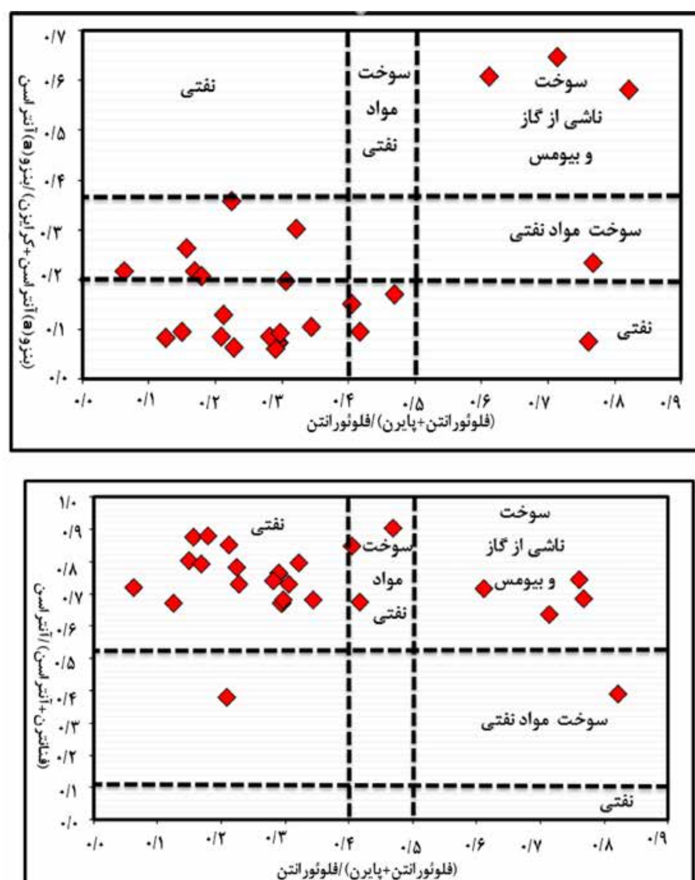


شکل ۵ درصد تعداد حلقه‌های آروماتیک‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه.

بر اساس نسبت LMW/HMW اگر این نسبت کمتر از ۱ باشد نشان‌دهنده منشأ پایروژنیک (احتراق) و اگر بیشتر از ۱ باشد نشان‌دهنده منشأ پتروژنیک (نفتی) می‌باشد [۲۷]. بر مبنای این شاخص عموما منشأ آروماتیک‌های رسوبات ساحل بوشهر نفتی می‌باشند. بر مبنای نسبت (Flu/Flu+Pyr) نیز اگر مقدار این نسبت کمتر از ۰/۴ باشد منشأ پتروژنیک (نفتی) و اگر بیش از ۰/۵ باشد منشأ پایروژنیک (احتراق) را نشان می‌دهد [۳۱-۳۲]. نسبت این ترکیب در نمونه‌ها بین ۰/۱ تا ۰/۷ است و این مهم نشان‌دهنده هر دو منشأ پتروژنیک و پایروژنیک در نمونه‌ها می‌باشد هرچند عمده نمونه‌ها منشأ پتروژنیک دارند. به منظور بررسی دقیق منشأ ترکیبات آروماتیک از نمودارهای متقاطع استفاده شده است (شکل۶). در این نمودارها محور X ها نسبت (فلوئورانتین+پایرن)/فلوئورانتین و نمودار Y نسبت‌های (بنزو (a) آنتراسن+کرایزن)/بنزو (a) آنتراسن و (فنانترن+آنتراسن)/آنتراسن می‌باشند.

بر مبنای این نمودارها ۴ منشأ برای این ترکیبات شناسایی شده است هرچند عمده نمونه‌ها منشأ نفتی را برای این ترکیبات نشان می‌دهد. نتایج منشأ یابی از پژوهش با مطالعات پیشین بر روی رسوبات سواحل بوشهر از جمله پژوهش صفاحیه و محمودی [۳۴] و باطنی و همکاران [۲۱] همخوانی دارد. بر مبنای این نتایج آلودگی ناشی از حمل و نقل، سوخت‌های گازی فلزهای نفتی، تولید و بهره‌برداری در میادین نفتی و گازی در ساحل بندر بوشهر منشأ اصلی این ترکیبات آروماتیک می‌باشند. لونگ [۳۵] برای ارزیابی کمی و کیفی آلودگی خاک و برای ارزیابی ریسک سلامت بر اساس دستورالعمل کیفی خاک (SOGS) شاخص‌های اکولوژیکی مانند ERM [1] (حد متوسط آستانه) و ERL [2] (حد پایین آستانه) را پیشنهاد کردند.

1. Effects Range Medium
2. Effects Range Low



شکل ۶ موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار متقاطع نسبت‌های تشخیصی به منظور منشأیابی ترکیبات آروماتیک بر مبنای حدود آستانه [۳۳].

معیارهـای ERL و ERM بـا اسـتفاده از صدک‌هـای 10 th و 50 th از افزایـش غلظـت در ارتبـاط بـا عـوارض جانبـی بیولوژیکـی می‌باشـد. غلظـت کمتـر از مقـدار ERL حداقـل اثـرات زیسـت محیطـی را دارد و بیانگـر تأثیراتـی اسـت کـه بـه نـدرت رخ می‌دهـد. غلظت‌هـای مسـاوی یـا بیشـتر از ERL و پایین‌تـر از ERL نشـان‌دهنده محـدوده تأثیـرات ممکـن[1] اسـت، کـه گاهـی رخ می‌دهنـد. غلظت‌هـای برابـر یـا بالاتـر از ERL نشـان‌دهنده تأثیـرات احتمالـی[2] هسـتند، اثراتـی کـه اغلـب رخ می‌دهنـد. در ایـن مطالعـه، مقادیـر محـدوده تأثیـرات بـا دامنـه کـم (ERL) و محـدوده تأثیـرات بـا دامنـه متوسـط (ERL) بـرای ارزیابـی سـمیّت زیسـت محیطـی گونه‌هـای PAHs مـورد اسـتفاده قـرار گرفـت و در جـدول ۲ ارائـه گردیـد.

ایـن غلظت‌هـا تحـت عنـوان سـه محـدوده در غلظت‌های شـیمیایی کـه همـرا بـا عـوارض جانبـی هسـتند، تعریـف شـوند بـه صـورت بنـدرت، گاهـی اوقـات و اغلـب مـوارد. نتایـج نشـان می‌دهـد کـه میانگیـن غلظـت تقریبـا تمـام PAH هـا کمتـراز مقادیـر ERL و در محـدوده تأثیـرات بـا دامنـه کـم اسـت. غلظـت ترکیـب Ace بیـش از ERL اسـت و ایـن مهـم نشـان از محـدوده تأثیـرات بـا دامنـه متوسـط بـرای ایـن ترکیـب دارد.

در سـال‌های گذشـته مطالعـات متعـددی در بـاره ترکیبـات آروماتیـک در سـاحل و فراسـاحل بوشـهر انجـام شـده اسـت از جملـه مطالعـات Jafarabadi و همـکاران [۳۶]، Mirza و همـکاران [۳۷] و Akhbarizade و همـکاران [۳۸]. اغلـب ایـن مطالعـات منشـأ پتروژنیـک و پایروژنیـک بـه صـورت مخلـوط در رسـوبات سـواحل اسـتان بوشـهر را تشـخیص دادنـد.

1. Possible-effects
2. Probable-effects

جدول ۲ معیارهای آلودگی استاندارد زیست شناختی اجزای هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی برای نمونه‌های مورد مطالعه [۳۵].

نمونه های مورد مطالعه		شاخص های اکولوژیک دستورالعمل کیفی خاک		ترکیبات
بیشینه (ppb)	میانگین (ppb)	حد آستانه متوسط (ppb)	حد آستانه پایین (ppb)	-
۱۶۹/۳	۱۰۴/۸	۵۰۰	۱۶	آسنفتیلن
۷۶/۱	۱۵/۶	۵۱۰۰	۶۰۰	فلوئورانتن
۹۸/۳	۴۱	۱۵۰۰	۲۴۰	فنانترن
۱۹۳/۶	۱۲۰/۱	۱۱۰۰	۸۵۳	آنتراسن
۵۵/۶	۲۸	۲۶۰۰	۶۶۵	پایرن
۱۵/۳	۸/۱	۲۸۰۰	۳۸۴	کرایزن
۱۵/۷۰	۱۴/۵	۱۶۰۰	۲۶۱	بنزو (a) آنتراسن
۹/۲	۸/۸	۱۸۸۰	۳۲۰	بنزو (k) فلوئورانتن

جدول ۳ مقایسه غلظت ترکیبات آروماتیک ساحل بندر بوشهر با مطالعات مشابه را نشان می‌دهد. بر مبنای این جدول غلظت ترکیبات در نمونه‌های مورد مطالعه بیش از ساحل گیلان [۳۹] و کمتر از سایر مطالعات می‌باشد. حد پایین و بالای غلظت این ترکیبات در محدوده مورد مطالعه نزدیک به مطالعات مشابه در بحرین و عربستان می‌باشد. علت اختلاف فاحش غلظت ترکیبات در پژوهش حاضر با مطالعه صفاحیه و محمودی [۳۴] می‌تواند به علت تفاوت ایستگاه‌ها و تمرکز مطالعه آنان بر ورودی فاضلاب‌ها به ساحل بوشهر باشد.

جدول ۳ مقایسه غلظت ترکیبات آروماتیک نوار ساحلی بندر بوشهر با مطالعات مشابه.

منبع	مجموع غلظت ترکیبات	منطقه مورد مطالعه
[۳۷]	۱۳-۶۶۰۰	ساحل بحرین
[۳۷]	۱۱۰-۴۰۰۰۰	ساحل عربستان
[۳۸]	۳۴-۱۳۸۷۰	ساحل فرانسه
[۳۰]	۴۷۹۰-۸۴۵	ساحل استان بوشهر
[۳۶]	۱۵/۷-۲۹/۱۴	ساحل گیلان
-	۲۰۶/۵-۱۴۶۳/۱	مطالعه حاضر

نتیجه‌گیری

بررسی غلظت ترکیبات آروماتیک در ساحل خلیج فارس در محدوده بندر بوشهر نشان داد که بیشترین میانگین غلظت به ترتیب متعلق به نفتالن، آسنفتن، آسنفتیلن، فنانترن، پایرن، آنتراسن، فلورانتن،بنزو-آنتراسن، بنزوپایرن، بنزو پریلن، بنزوفلورانسن، کرایسن و بنزوفلورانتن می‌باشد. مقدار کل ترکیبات آروماتیک در رسوبات ساحلی بندر بوشهر بین ۲۰۶ ng/g تا ۱۴۶۳ در نوسان می‌باشد که در محدوده غلظت‌های گزارش شده در مطالعات مشابه در سواحل خلیج فارس می‌باشد. عمده ترکیبات آروماتیک‌های این رسوبلت ترکیبات سبک و ۲ و ۳ حلقه آروماتیک می‌باشند. بیشترین حجم ترکیبات آروماتیک در نوار شمالی ساحل و بخش میانی ساحل متمرکز است و در نوار جنوبی ساحل نیز غلظت ترکیبات کم می‌باشد. روند تغییرات ترکیبات آروماتیک سبک مشابه روند مذکور است اما روند تغییرات آروماتیک‌های سنگین متفاوت و

عمده تمرکز آنان در بخش میانی ساحل است و به سمت شمال و جنوب ساحل تمرکز این ترکیبات کم می‌شود هرچند غلظت بعضی از این ترکیبات در چندین ایستگاه زیر حد تشخیص بوده است. ایستگاه‌های شمالی نوار ساحلی در همجواری جاده و مسیرهای حمل و نقل قایقرانی می‌باشند از این رو یکی از منشأ آلودگی این ایستگاه‌ها، آلودگی‌های ناشی از این فعالیت‌ها می‌باشد. از سویی دیگر این ایستگاه‌ها در جنوب غرب جزیره خارک قرار دارند و جایی که جریان‌های دریایی توانایی انتقال آلودگی‌های ناشی از بهره‌برداری و انتقال فرآورده‌های نفتی در میادین فراساحل خلیج فارس به ساحل را دارند و این مهم منبع این ترکیبات آروماتیک می‌باشد. در بخش میانی ساحل نیز ورود فاضلاب‌های شهری و زباله به این ساحل وجود دارد که دراین قسمت نیز آلودگی حاصل از حمل و نقل زمینی و دریایی و جریان‌های دارای آلودگی از میدان گازی گلشن منشأ این ترکیبات می‌باشند. بر مبنای شاخص‌های مختلف منشأیابی، منشأ این ترکیبات مختلف و شامل پایروژنیک و پتروژنیک می‌باشد. هرچند تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها منشأ نفتی و پتروژنیک را نشان می‌دهند که با مطالعات قبلی بر روی سواحل خلیج فارس و بوشهر مشابه می‌باشد. بر مبنای استانداردهای آلودگی ایستگاه‌های بخش میانی نوار ساحلی در شمال نوار ساحلی بندر بوشهر از منظر ترکیبات آروماتیک دارای بار آلودگی بالا می باشند و سایر ایستگاه ها دارای بار آلودگی متوسط می‌باشد. براساس ارزیابی کمی و کیفی آلودگی خاک و دستورالعمل کیفی خاک (SOGS) شاخص‌های غلظت تمامی هیدروکربن‌ها در محدوده تأثیرات با دامنه کم است و تنها غلظت ترکیب Ace در محدوده تأثیرات با دامنه متوسط می‌باشد. با توجه به اثرات منفی این ترکیبات بر انسان وآبزیان و همچنین تداوم فعالیت‌های صنعتی، بندرگاهی و نفتی در سواحل خلیج فارس پایش مداوم این ساحل و حتی رسوبات فراساحل امری ضروری در راستای کنترل شرایط زیست محیطی این اکوسیستم می‌باشد.

مراجع

[1]. Naji, A., & Sohrabi, T. (2015). Distribution and contamination pattern of heavy metals from surface sediments in the southern part of Caspian Sea, Iran, Chemical Speciation and Bioavailability, 27(1): 29-43, doi.org/10.1080/09542299.2015.1023089.

[2]. li Azadi, N., Mansouri, B., Spada, L., Sinkakarimi, M.H., Hamesadeghi, Y. and Mansouri, A., (2018). Contamination of lead (Pb) in the coastal sediments of north and south of Iran: a review study, Chemistry and Ecology, 34, 9: 884-900, doi.org/10.1080/02757540.2018.1508462.

[3]. Elsagh, A., Jalilian, H., & Aslshabestari, M. G., (2021). Evaluation of heavy metal pollution in coastal sediments of Bandar Abbas, the Persian Gulf, Iran: Mercury pollution and environmental geochemical indices, Marine Pollution Bulletin, 167, 112314, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112314.

[4]. Lin, F., Han, B., Ding, Y., Li, Q., Gao, W., & Zheng, L., (2018), Distribution characteristics, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Qinhuangdao coastal wetland, China, Marine Pollution Bulletin, 127: 788-793, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.054.

[5]. Loyeh, E. N., & Mohsenpour, R., (2020). Investigation of oil pollution on aquatic animals and methods of its prevention, Journal of Aquaculture and Marine Biology, 9(5), 160-165, doi: 10.15406/jamb.2020.09.00291.

[6]. Jisr, N., Younes, G., El Omari, K., Hamze, M., Sukhn, C., & El-Dakdouki, M. H. (2020). Levels of heavy metals, total petroleum hydrocarbons, and microbial load in commercially valuable fish from the marine area of Tripoli, Lebanon, Environmental Monitoring and Assessment, 192, 11: 1-13.

[۷]. خمار باقی، ز.، آموزگار، م.، شومندی، م.، دستغیب، م.، تیرانداز، ح. (۱۳۹۴) بررسی توانایی باکتری‌های بومی خاک جزیره سیری در پاکسازی آلودگی‌های نفتی، پژوهش نفت، ۲۵(۸۵-۱): ۱۹۲-۱۸۰.

[۸]. قربان‌نژاد، ح.، مقیمی، ح.، دستغیب، م. (۱۳۹۹). افزایش تجزیه زیستی هیدروکربن‌های سنگین توسط آسپرژیلوس سودودفلکتوس F13 در حضور رامنولیپید، پژوهش نفت، ۳۰، ۹۹-۲، ۷۵-۶۱.

[9]. Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A. & Hamid, F. S., (2020). Remediation of soil and water contaminated with

petroleum hydrocarbon: A review, Environmental Technology and Innovation, 17: 100526, doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526.

[۱۰]. ماشینچیان مرادی، ع.، ممهد هروی، م.، عبدی اسکویی، ح.، محمودی، ا.، اسکندری، م.، (۱۳۹۲). بررسی هیدروکربن‌های آلیفاتیک در ترکیب نفت خام سکوهای نفتی خلیج فارس، پژوهش نفت، ۲۳(۷۴): ۱۵۰-۱۴۴.

[۱۱]. سلطانی، م.، قاسمی، ص.، کامرانی، ا. (۱۴۰۲). ارزیابی وضعیت آلودگی هیدروکربن‌های نفتی کل در رسوبات پیرامونی اکوسیستم‌های مرجانی) مطالعه موردی: تاالب بین‌المللی شیدور، پژوهش نفت، ۳۳: ۱۲۹، تحت چاپ، doi:10.22078 /PR.2023.5000.3230.

[۱۲]. حبیبی واحد زنجانی، ش. (۱۳۹۳). پیش‌بینی کیفی و کمی بررسی فرآیندهای مؤثر بر سطح لکه نفت و میعانات گازی حاصل از ریزش اتفاقی در سواحل شمالی خلیج فارس، پژوهش نفت، ۲۴(۷۷): ۱۴۷-۱۳۵.

[13]. Baumard, P., Budzinski. H/, Garrigues. P/, Sorbe. J. C., Burgeot, T., Belloca, J., (1998). Concentration of PAH in various marine organisms in relation to those in sediments to throphic level, Marin Pollution Bulletin, 36: 951-960, doi.org/10.1016/S0025-326X(98)00088-5.

[14]. Guitart, C., García-Flor, N., Bayona, J.M. and Albaigés, J., (2007). Occurrence and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal surface microlayer, Marine Pollution Bulletin, 54: 186–194, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.10.008.

[۱۵]. حسینی بیزکی، ر.، ربانی، ا.، ریاحی بختیاری، ع. ر. چ. (۱۳۹۹) بررسی روند تغییرات آلودگی‌های نفتی موجود در رسوبات سطحی دریای خزر (سواحل استان مازندران)، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۲(۲): ۴۳۶-۴۲۷، doi: 10.22060/CEEJ.2018.14404.5647.

[16]. Cortazar, E., Bartolomé, L., Arrasate, S., Usobiaga, A., Raposo, J.C., Zuloaga, O. and Etxebarria, N., (2008). Distribution and bioaccumulation of PAHs in the UNESCO protected natural reserve of Urdaibai, Bay of Biscay, Chemosphere, 72: 1467–1474, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.05.006.

[17]. Liang Y, Tse M F, Young L and Wong M H (2007) Distribution patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the sediments and fish at Mai Po Marshes Nature Reserve, Hong Kong, Water Research, 41, 6: 1303-1311, doi.org/10.1016/j.watres.2006.11.048.

[18]. Sun, K., Song, Y., He, F., Jing, M., Tang, J. & Liu, R., (2021). A review of human and animals exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: Health risk and adverse effects, photo-induced toxicity and regulating effect of microplastics, Science of The Total Environment, 773: 145403, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145403.

[19]. Pardo, M., Qiu, X., Zimmermann, R., & Rudich, Y., (2020). Particulate matter toxicity is Nrf2 and mitochondria dependent: the roles of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons, Chemical research in toxicology, 33, 5: 1110-1120, doi.org/10.1021/acs.chemrestox.0c00007.

[20]. Mazarji, M., Minkina, T., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Bidhendi, G. N., Barakhov, A., & Bhatnagar, A. (2021) Effect of nanomaterials on remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons-contaminated soils: A review, Journal of environmental management, 284: 112023, doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112023.

[۲۱]. باطنی، ف.، مهدی‌نیا، ع.، سید هشترودی، م. (۱۳۹۸). هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای رسوبات سطحی فراساحل در شمال خلیج فارس، استان بوشهر، نشریه علمی-پژوهشی اقیانوس شناسی، ۳۷(۱۰): ۷۳-۶۵.

[22]. Gustafson, K. E., & Dickhut, R. M. (1997). Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in Southern Chesapeake bay surface water: evaluation of three methods for determining freely dissolved water concentrations, Environmental Toxicology and Chemistry, 16: 452–461, doi.org/10.1002/etc.5620160310.

[23]. Hung, C. M., Huang, C. P., Chen, C. W., & Dong, C. D. (2021). Degradation of organic contaminants in marine sediments by peroxymonosulfate over LaFeO3 nanoparticles supported on water caltrop shell-derived biochar and the associated microbial community responses, Journal of Hazardous Materials, 420, 126553, doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126553.

[24]. Jin, J., Sun, K., Liu, W., Li, S., Peng, X., Yang, Y., & Wang, X. (2018). Isolation and characterization of biochar-derived organic matter fractions and their phenanthrene sorption, Environmental Pollution, 236: 745-753, doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.015.

[25]. Qiao, Z., Hu, S., Wu, Y., Sun, R., Liu, X., & Chan, J. (2021)Changes in the fluorescence intensity, degradability, and aromaticity of organic carbon in ammonium and phenanthrene-polluted aquatic ecosystems, RSC advances, 11, 2: 1066-1076, doi: 10.1039/D0RA08655J.

[26]. Soni, V., Singh, P., Shree, V., & Goel, V. (2018), Effects of VOCs on human health, In Air pollution and control 119-142, Springer, Singapore.
[27]. Kumpiene, J., Larsson, M. O., Carabante, I., & Arp, H. P. H. (2021). Roads with underlying tar asphalt-spreading, bioavailability and toxicity of their polycyclic aromatic hydrocarbons, Environmental Pollution, 289: 117828, doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117828.
[28]. Bahrami, S., Moore, F., & Keshavarzi, B. (2021). Evaluation, source apportionment and health risk assessment of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and vegetable of Ahvaz metropolis, Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 27(1): 71-100, /doi.org/10.1080/10807039.2019.1692300.
[29]. Qi, P., Qu, C., Albanese, S., Lima, A., Cicchella, D., Hope, D., & De Vivo, B. (2020). Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Caserta provincial territory, southern Italy: Spatial distribution, source apportionment, and risk assessment, Journal of hazardous materials, 383, 121158, doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121158.
[30]. Chokor, A. A. (2022). Distribution, source fingerprinting and ecotoxic potential evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the River Niger at Okpu and Iyiowa-Odekpe axes in South-Eastern, Nigeria, World Scientific News, 172, 296-316.
[31]. Dos Santos, P. R. S., Moreira, L. F. F., Moraes, E. P., de Farias, M. F., Domingos, Y. S. (2021). Traffic-related polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) occurrence in a tropical environment, Environmental Geochemistry and Health, 43(11): 4577-4587.
[32]. El-Naggar, M., Hanafy, S., Younis, A. M., Ghandour, M. A., & El-Sayed, A. A. Y. (2021). Seasonal and Temporal Influence on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Red Sea Coastal Water, Egypt, Sustainability, 13, 21: 11906, doi.org/10.3390/su132111906.
[33]. Brewster, C. S., Sharma, V. K., Cizmas, L., McDonald, T. J. (2018). Occurrence, distribution and composition of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment cores from the Lower Fox River, Wisconsin, US. Environmental Science and Pollution Research, 25(5), 4974-4988.
[۳۴]. صفاهیـه، ع.، محمـودی، م. (۱۳۹۳). غلظـت هیدروکربن‌هـای آروماتیـک چنـد حلقـه‌ای در رسـوبات سـاحلی بوشـهر، فصلنامـه علـوم و تکنولـوژی محیـط زیسـت، ۳، ۱۶: ۳۳-۲۵.
[35]. Yuan, Z., He, B., Wu, X., Simonich, S. L. M., Liu, H., Fu, J., & Wang, Q. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban stream sediments of Suzhou Industrial Park, an emerging eco-industrial park in China: Occurrence, sources and potential risk, Ecotoxicology and Environmental Safety, 214: 112095, doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112095.
[36]. Jafarabadi, A. R., Bakhtiari, A. R., & Toosi, A. S. (2017). Comprehensive and comparative ecotoxicological and human risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in reef surface sediments and coastal seawaters of Iranian Coral Islands, Persian Gulf. Ecotoxicology and Environmental Safety, 145: 640-652, doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.016.
[37]. Mirzaei, M., Arbabi, M., Mohammadi Bardkashki, B. (2018). Source identification and ecological risk Hydrocarbon. InTech. London, United Kingdom, 117.
[38]. Akhbarizadeh, R., Moore, F., Keshavarzi, B., & Moeinpour, A. (2016). Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons risk assessment in coastal water and sediments of Khark Island, SW Iran, Marine Pollution Bulletin, 108, 1-2: 33-45, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.004.
[۳۹]. محمـدی گلنگـش، م.، ابراهیمـی سـیریزی، ز. (۱۳۹۶). منشـأیابی و ارزیابـی خطـر هیدروکربنهـای چنـد حلقـه‌ای آروماتیـک (PAHs) در رسـوبات سـاحلی دریـای خـزر، اسـتان گیـلان. مجلـه دانشـگاه علـوم پزشـکی مازنـدران، ۲۷(۱۵۵): ۱۲۸-۱۴۰.
[40]. Tolosa, I., Mora, S. I., Fowler, S. W., Villeneuve, J. P., Bartocci, J., & Cattini, C. (2005). Aliphatic and aromatic hydrocarbons in marine biota and coastal sediments from the Gulf and the Gulf of Oman, Marine Pollution Bulletin, 50: 1619-1633, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.06.029.
[41]. Mille, G., Asia, L., Guiliano, M., Malleret, L., & Doumenq, P. (2007). Hydrocarbons in coastal sediments from the Mediterranean Sea (Gulf of Fos area, France), Marine Pollution Bulletin, 54: 566–575, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.12.009.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۶۰-۱۴۷

مقایسه عملکرد جاذب‌های کلسیمی تهیه‌شده از منابع سنگ‌آهک و پوسته تخم‌مرغ در جذب دی‌اکسید کربن طی فرآیند چرخه کلسیم و بهبود کارایی آن‌ها

مهری ایمانی[1]، مریم طهماسب پور[1*] و پدرو انریکو سانچز خیمنز[2]

۱- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، ایران

۲- گروه علم و مواد، موسسه سسیک، دانشگاه سویا، اسپانیا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

چکیده

در سال‌های اخیر، کاهش آلودگی هوای ناشی از انتشار گسترده گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسید کربن توسط فرآیند جذب سطحی چرخه‌ای و با استفاده از جاذب‌های مبتنی بر کلسیم موردتوجه بوده است. علی‌رغم عملکرد خوب این جاذب‌ها، کاهش ظرفیت جذب ناشی از تف‌جوشی با افزایش تعداد چرخه‌ها، همچنان چالش بزرگی به‌حساب می‌آید. در این راستا، در مقاله حاضر عملکرد دو منبع کلسیمی تهیه‌شده از سنگ معدن آهک و پوسته تخم‌مرغ از لحاظ ظرفیت جذب در بیست چرخه کربناسیون و کلسیناسیون متوالی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. سپس به‌منظور غلبه بر مشکل تف جوشی، هر دو جاذب سنگ‌آهک و پوسته تخم‌مرغ با اسید استیک در غلظت ۱۰٪ حجمی فرآوری شدند. نتایج نشان دادند که حضور اسید استیک در هر دو نوع جاذب منجر به افزایش میزان تبدیل مؤثر شده، به‌طوری‌که در پایان چرخه‌ی بیستم، مقادیر ۰/۳۸ و ۰/۳۳ به‌ترتیب برای میزان تبدیل مؤثر سنگ‌آهک و پوسته تخم‌مرغ دارای ۱۰٪ حجمی اسید استیک به‌دست آمد که در مقایسه با مقدار متناظر آن برای سنگ‌آهک و پوسته تخم‌مرغ خام (در غیاب اسید استیک) یعنی ۰/۲۴ و ۰/۲۰ افزایش قابل‌توجهی است. دلیل افزایش میزان تبدیل در اثر استفاده از اسید استیک را می‌توان به تشکیل استات کلسیم نسبت داد که منجر به تشکیل ساختارهای متخلخل‌تر و پایدارتر می‌شود. با مقایسه دو منبع کلسیمی به‌کار گرفته‌شده در این مطالعه مشخص شد که سنگ‌آهک ازلحاظ ظرفیت جذب عملکرد بهتری نسبت به پوسته تخم‌مرغ دارد، به‌طوری‌که میزان تبدیل سنگ‌آهک خام ۱/۲ برابر میزان تبدیل پوسته تخم‌مرغ خام به‌دست آمد که به خلوص بالا و همچنین اندازه کریستالی بزرگ‌تر آن در مقایسه با پوسته تخم‌مرغ مرتبط است.

کلمات کلیدی: جذب دی‌اکسید کربن، چرخه کلسیم، سنگ‌آهک، پوسته تخم‌مرغ، اسید استیک

---

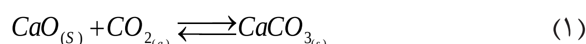
*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی tahmasebpoor@tabrizu.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.4921.3199)

مقدمه

گازهای گلخانه‌ای که به‌طور طبیعی شامل بخارآب، دی‌اکسید کربن، متان، دی نیتروژن مونوکسید و ازن می‌باشند، گازهایی هستند که جذب و انتشار پرتوها توسط آن‌ها در محدوده مادون‌قرمز اتفاق می‌افتد و عامل اصلی پدیده گلخانه‌ای به‌شمار می‌آیند [۱]. امروزه با افزایش جمعیت در کره زمین و رشد فعالیت‌های صنعتی از قبیل نیروگاه‌ها، فراوانی این گازها افزایش چشم‌گیری داشته است به‌طوری‌که خروجی نیروگاه‌های سوخت فسیلی ۳۷٪ از کل دی‌اکسید کربن آزادشده در جهان را شامل می‌شوند [۲]. افزایش دی‌اکسید کربن به‌عنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای منجر به افزایش ۶۷٪ دما شده است [۳]. با در نظر گرفتن نیروگاه‌های متعددی که همچنان فعال هستند می‌توان پیش‌بینی کرد که ادامه روند تولید دی‌اکسید کربن می‌تواند برای محیط‌زیست بسیار خطرناک باشد. لذا یافتن روش‌هایی کارآمد برای کاهش میزان دی‌اکسید کربن تولیدشده در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان بوده است [۴]. روش جذب سطحی که در آن گاز دی‌اکسید کربن با استفاده از یک جاذب جامد برروی سطح جاذب، جذب می‌شود و به‌دلیل مصرف کم انرژی، هزینه پایین، تجهیزات ساده و مواد اولیه در دسترس روش بسیار مؤثری است [۵]. جاذب‌های جامد را می‌توان به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی کرد [۶] که جاذب‌های فیزیکی دارای ساختار حفره‌ای در مقیاس میکرو بوده و دارای تخلخل و سطح ویژه زیاد هستند اما دوام‌پذیری و ظرفیت جذب کم آن‌ها باعث شده است که محققین به سراغ جاذب‌هایی بروند که با وجود داشتن ساختاری متخلخل، ظرفیت جذب بالایی هم داشته باشند. این امر مستلزم وقوع واکنش شیمیایی در سطح جاذب‌ها است، به‌طوری‌که مولکول‌های دی‌اکسید کربن با تشکیل پیوند کووالانسی بتوانند برروی این جاذب‌ها جذب شوند [۷]. از بهترین جاذب‌های شیمیایی می‌توان به اکسیدهای فلزاتی مثل کلسیم، منیزیم، آهن، تیتانیوم و ... اشاره کرد. کلسیم اکسید به‌علت داشتن تخلخل زیاد، ظرفیت جذب و فعالیت بالا و سینتیک سریع کربناسیون/ کلسیناسیون از بهترین جاذب‌های جامد از نوع شیمیایی به‌شمار می‌رود [۸]. جاذب‌های مبتنی بر کلسیم به‌دست‌آمده از منابع معدنی نظیر سنگ‌آهک و مواد دورریز زیستی نظیر پوسته تخم‌مرغ[1] نه‌تنها هزینه تأمین بسیار اندکی دارند بلکه در شرایط عملیاتی و در دماهای بالای موردنیاز در نیروگاه‌ها، همچنان ظرفیت جذب بالای خود را حفظ می‌کنند [۹ و ۱۰]. فرآیند چرخه کلسیم[2] که شماتیکی از آن در شکل ۱ ارائه‌شده است، یکی از مطلوب‌ترین فن‌آوری‌های جذب دی‌اکسید کربن است که در طی آن مطابق واکنش (۱)، کلسیم کربنات و کلسیم اکسید به‌صورت بازگشتی به یکدیگر تبدیل می‌شوند تا دی‌اکسید کربن از گازهای خروجی نیروگاه‌ها جدا شود.

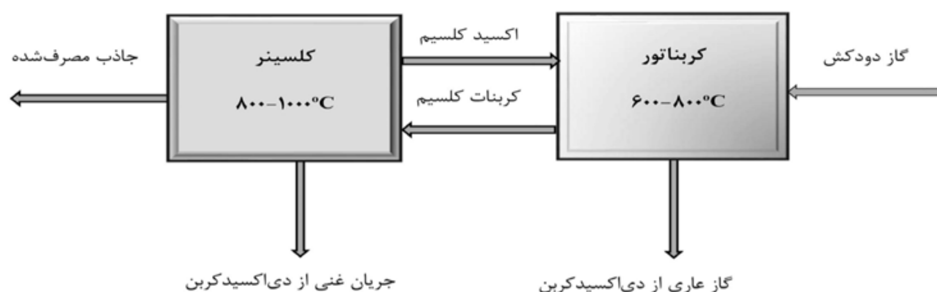


$$CaO_{(s)} + CO_{2_{(g)}} \rightleftarrows CaCO_{3_{(s)}} \qquad (۱)$$

$$\Delta H_0^r = 178 \frac{KJ}{mol}$$

فرآیند چرخه کلسیم معمولاً در راکتور بسترسیال یا در دستگاه آنالیز توزین حرارتی[3] انجام می‌گیرد که در آن‌ها، دو مرحله با نام‌های کربناسیون و کلسیناسیون وجود دارد که واکنش‌های جذب و دفع در آن‌ها انجام می‌گیرد و به‌ترتیب با کربناتور و کلسینر شناخته می‌شوند. در کربناتور، فرآیند کربناسیون جاذب در حضور گاز دی‌اکسید کربن در دماهای ۶۰۰ °C تا ۷۰۰ °C رخ می‌دهد و در کلسینر، فرآیند کلسیناسیون در دمای ۸۰۰ °C تا ۱۰۰۰ °C به‌منظور بازیابی مجدد جاذب انجام می‌شود [۱۱]. واکنش کربناسیون خود در دو مرحله متوالی انجام می‌شود. مرحله اول که کربناسیون سریع نام دارد توسط سینتیک واکنش کنترل می‌شود و در مرحله دوم یا مرحله کند عمدتاً توسط نفوذ گاز دی‌اکسید کربن از میان حفرات جاذب کنترل می‌شود [۱۲].

1. Eggshell
2. Calcium Looping Process
3. Thermo Gravimetric Analysis (TGA)

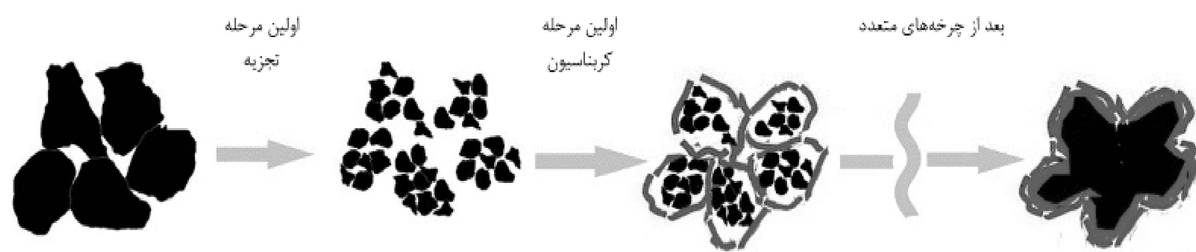


شکل ۱ شماتیکی از فرآیند چرخه‌ی کلسیم

یکی از معایب عمده فرآیند چرخه کلسیم، کاهش فعالیت جاذب (پایداری حرارتی) با افزایش تعداد چرخه‌ها به‌دلیل افزایش تفجوشی است که در حضور دمای بالای عملیات چرخه‌ای امری اجتناب‌ناپذیر است [۱۳]. شماتیک کیفی تف جوشی که عبارت است از تشکیل شبکه‌ای به‌هم‌پیوسته از کلسیم اکسید (اسکلت) در طول چرخه‌های کربناسیون/ کلسیناسیون، در شکل ۲ نشان داده‌شده است.

برای رفع این مشکل از اصلاح جاذب به روش‌های مختلف از قبیل استفاده از اسیدهای آلی و معدنی، حرارت‌دهی، آبدهی و همچنین افزودن فلزاتی چون آلومینیم، زیرکونیوم، منیزیم، آهن، تیتانیوم، سیلیکا و ... استفاده می‌شود [۱۴]. عمل اصلاح جاذب نه‌تنها باعث افزایش طول عمر آن شده، بلکه ظرفیت جذب را نیز به‌خوبی تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، در مطالعه‌ای که توسط هیوز و همکارانش [۱۵] انجام شد، از روش هیدراسیون برای بهبود خواص کلسیم اکسید به‌دست‌آمده از سنگ‌آهک استفاده شد. آن‌ها اثر فرآیند هیدراسیون را برروی جاذب، قبل از قرار گرفتن در چرخه‌های TGA بررسی کردند که در آن کربناسیون با جریان گاز شامل ۱۵٪ حجمی دی‌اکسید کربن و ۸۵٪ حجمی نیتروژن انجام‌گرفته بود و متعاقباً کلسیناسیون در ۸۰۰ °C در حضور نیتروژن خالص رخ می‌داد. براساس گزارش این محققین، جاذب فرآوری شده با هیدراسیون در چرخه بیستم تبدیل بالای ۵۲٪ داشت، درحالی‌که تبدیل دی‌اکسید کربن به‌دست‌آمده توسط سنگ‌آهک بدون هیدراسیون در همان شرایط عملیاتی ۴۰٪ بود. این افزایش در جذب دی‌اکسید کربن به چگالی پایین‌تر سنگ‌آهک هیدراته نسبت به سنگ‌آهک خام که منجر به بهبود فضاهای منافذ و سطح ویژه شده بود، نسبت داده شد. در مطالعه دیگری که برروی جاذب مبتنی بر کلسیم کربنات اصلاح‌شده توسط پیش فرآوری حرارتی انجام شد، مانوویچ و همکارانش [۱۶] به این نتیجه رسیدند که اعمال دماهای بالا، مانند ۱۰۰۰ °C می‌تواند تبدیل کلسیم اکسید را افزایش دهد. دلیل اصلی بهبود میزان تبدیل حتی با افزایش تعداد چرخه‌ها، پدیده خود فعال‌سازی مجدد[۱] است که با تجزیه کامل کلسیم کربنات، انتشار پیوسته یون در مرحله کلسیناسیون رخ می‌دهد و درنهایت منجر به یک اسکلت سخت و ساختار پایدارتر می‌شود. روش دیگر برای افزایش ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن جاذب‌های مبتنی بر کلسیم اکسید، واردکردن ترکیبات فلزی در ساختار جاذب‌ها با استفاده از روش‌های سل-ژل، اختلاط خشک یا اختلاط مرطوب و روش تلقیح است [۱۷]. دوپه کردن جاذب‌های طبیعی به‌عنوان یک روش ارزان، نه‌تنها واکنش‌پذیری را بهبود می‌بخشد، بلکه نرخ کاهش فعال‌سازی را نیز پایین می‌آورد. کویرالا و همکاران [۱۸] دریافتند که افزودن سریم به جاذب‌های کلسیم اکسید می‌تواند ظرفیت جذب را بیشتر بهبود بخشد.

1. Self-Reactivation



شکل ۲ شماتیکی از مکانیسم تف جوشی جاذب‌های کلسیم بنیان در چرخه‌های کربناسیون/ کلسیناسیون

به‌طور مشابه، لی و همکارانش [۱۹] نقش افزودنی پرمنگنات پتاسیم را با غلظت‌های مختلف از ۰/۵ تا ۰/۸٪ وزنی بر رفتار چرخه‌ای سنگ‌آهک بررسی کردند و مشاهده شد که سنگ‌آهک با ۰/۸درصد وزنی دوپ شده با پرمنگنات پتاسیم در مقایسه با جاذب خام پایدارتر بود. علاوه‌براین، حیدری و همکارانش [۲۰] جاذب‌های سنتز شده مبتنی بر کلسیم اکسید را پیشنهاد کردند که توسط اکسیدهای تک فلزی (زیرکونیوم، آلومینیم، سریم) و دوفلزی (آلومینیم/ سریم، زیرکونیوم/ سریم و آلومینیم/ زیرکونیوم) و سه فلزی (زیرکونیوم/ آلومینیم/ سریم) اصلاح‌شده‌اند. در بین جاذب‌های سنتز شده، ترکیب کلسیم/زیرکونیوم/ آلومینیم/ سریم با درصد غیرفعال شدن برابر با ۱۷/۸ پس از ۵۰ چرخه، به‌عنوان امیدوارکننده‌ترین جاذب ازنظر ظرفیت جذب معرفی شد. این عملکرد عالی را می‌توان به تشکیل اکسیدهای $CaZrO_3$ و $Ca_3Al_2O_6$ مقاوم در برابر حرارت نسبت داد که باعث کاهش تف جوشی در طول چرخه می‌شود. همچنین، استفاده از یک قالب قابل اشتعال مبتنی بر کربن اخیراً به‌عنوان یک روش اصلاح بهبود یافته برای فرآیندهای جذب دی‌اکسید کربن توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این راستا، موسوی و همکارانش [۲۱ و ۲۲] از نانولوله‌های کربنی چند جداره به‌عنوان یک قالب قابل اشتعال برای تقویت عملکرد حلقوی جاذب های تثبیت شده با دی اکسید زیرکونیم در طول فرآیند جذب دی‌اکسید کربن استفاده کردند. مقدار ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی به جاذب کلسیم اکسید حاوی ۱۲/۸٪ وزنی دی اکسید زیرکونیوم نشان داد که با استفاده از ۱۰ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به‌ترتیب ۳۵/۲۵، ۱۸۵٪ و ۱۴۱٪ بهبود در اندازه ذرات کلسیم اکسید، سطح ویژه و حجم منافذ، در مقایسه با جاذب کلسیم اکسید اصلاح شده با دی اکسید زیرکونیوم بدون قالب، به‌دست آمد. جاذب‌های مبتنی بر کلسیم در دو نوع طبیعی و سنتزی یافت می‌شوند. منظور از منابع طبیعی برای جاذب‌های کلسیمی موادی هستند که بدون اعمال هرگونه دست‌کاری شیمیایی در طبیعت و معادن و یا برخی منابع دورریز یافت می‌شوند. درحالی‌که منظور از مواد سنتز شده جاذب‌هایی هستند که در شرایط آزمایشگاهی و با افزودن برخی مواد شیمیایی تهیه‌شده‌اند. جاذب‌های کلسیمی طبیعی عمدتاً از سنگ‌آهک، دولومیت[1] و پوسته تخم حیوانات از قبیل تخم‌مرغ، شترمرغ و برخی میوه‌ها نظیر نارگیل به‌دست می‌آیند. استفاده از جاذب‌های طبیعی، به‌دلیل در دسترس بودن و امکان استفاده مجدد از آن‌ها آسان‌ترین و ارزان‌ترین راه برای به‌دست آوردن جاذب کلسیم اکسید جهت جذب دی‌اکسید کربن است. سان و همکارانش [۲۳] از گل آهک[2] تولید شده در کارخانه کاغذ به‌عنوان جاذب حذف‌کننده دی‌اکسید کربن، پس از عملیات پیش شستشو استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که گل آهک شست‌وشو داده شده، ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن بالاتری در مقایسه با گل آهک دارد و ریزساختار آن در طول فرآیند کربناسیون افزایش یافته است.

1. Dolomite
2. Lime Mud

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۶۰-۱۴۷

پیزارو و همکارانش [24] عملکرد جاذب کلسیم اکسیدی حاصل از سرباره فولاد به‌عنوان ماده دورریز را پس از اصلاح آن با اسید استیک در نظر گرفتند. با نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، کارایی بالای جاذب از نظر کاهش زمان‌ماند در دمای $900\ ^{\circ}C$ در مقادیر بالای فشار جزئی دی‌اکسید کربن، تائید شد. ما و همکارانش [25] از سرباره کاربید[1] به‌دست‌آمده از صنعت پلی‌وینیل‌کلراید را به‌عنوان ماده پایه برای سنتز جاذب دی‌اکسید کربن در حضور سیمان حاوی آلومینا و محصول جانبی بیودیزل استفاده کردند. آن‌ها عملکرد جاذب‌ها را در دمای بالا و غلظت دی‌اکسید کربن که نزدیک به عملیات صنعتی واقعی بود، بررسی کردند. براساس نتایج به‌دست آمده، در پایان چرخه سی‌ام، جاذب حاوی ۹۰٪ وزنی کلسیم اکسید بالاترین ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن را داشت که در حدود ۰/۲۷ gr/gr adsorbent و ۱/۷ برابر بیشتر از سرباره کاربید خام بود. در پژوهش حاضر، ابتدا ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن سنگ‌آهک به‌عنوان منبع معدنی و پوسته تخم‌مرغ به‌عنوان منبع طبیعی دورریز بررسی و مقایسه شده است. سپس اثر افزودن اسید استیک در غلظت حجمی مشخص برروی عملکرد جذب آن‌ها مطالعه شده است. برای بررسی بارگذاری موفقیت‌آمیز اسید استیک، ترکیب فاز، مورفولوژی سطح جاذب‌ها و ظرفیت جذب آن‌ها، از آنالیزهای طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه[2] (FTIR)، پراش پرتوایکس[3] (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی[4] (SEM)، BET و TGA استفاده‌شده است.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی مورداستفاده

ضایعات اولیه پوسته تخم‌مرغ (دارای آنالیز عنصری به‌صورت ۱۸/۶۷٪ کربن، ۳۸/۶۲٪ اکسیژن، ۱/۵۷٪ سدیم، ۱/۳۱٪ منیزیم، ۰/۴۱٪ آلومینیم، ۱/۳۴٪ سیلیسیم و ۳۸/۰۸٪ کلسیم) از رستوران‌های محلی تبریز جمع‌آوری شد. سنگ‌آهک یا سنگ‌آهک (با خلوص ۹۹/۵٪ کلسیم کربنات) نیز از معدن کوه سفید قم واقع در استان قم تهیه شد. از اسید استیک (با خلوص ۱۰۰-۹۹٪) تهیه‌شده از تولیدکننده مواد شیمیایی VWR به‌عنوان یک اصلاح‌کننده، استفاده شد. در تمامی مراحل آزمایش‌ها از آب مقطر استفاده شد.

روش‌های تهیه جاذب‌های پایه

در ابتدا پوسته‌های تخم‌مرغ با آب دیونیزه شسته شده و پس از جدا کردن بافت‌های داخلی و خشک‌کردن آن‌ها در دمای $60\ ^{\circ}C$ در آون، در هاون چینی خردشده و سپس با استفاده از آسیاب برقی، پودر پوسته تخم‌مرغ خام به‌دست آمد. برای دست‌یابی به توزیع یکنواختی از اندازه ذرات، پوسته تخم‌مرغ با استفاده از مش شماره ۳۲۰ غربال شدند تا ذراتی با قطر کوچک‌تر از ۴۵ µm به‌دست آیند. در مورد نمونه سنگ‌آهک، سنگ‌آهک تهیه‌شده از معدن قم، ابتدا به قطعات کوچک‌تر شکسته شد در مرحله بعد در هاون چینی خردشده و پس از استفاده از آسیاب برقی پودر به‌دست‌آمده با استفاده از آب دیونیزه سه بار شستشو داده شد تا آلودگی‌ها و نمک‌های موجود احتمالی از آن جدا شود و درنهایت پودر سنگ‌آهک در دمای $60\ ^{\circ}C$ در آون خشک شد و پس از عبور از مش شماره ۳۲۰، نمونه سنگ‌آهک خام با ذراتی به قطرهای کوچک‌تر از ۴۵ µm به‌دست آمد. در این نوشتار، نمونه پوسته تخم‌مرغ خام و سنگ‌آهک خام آماده‌شده به‌روش‌های فوق به‌ترتیب با Raw Egg-shell و Raw Limestone معرفی‌شده‌اند.

روش تهیه نمونه‌های اصلاح‌شده با اسید استیک

برای اصلاح جاذب‌ها، ۲۵۰ ml اسید استیک با غلظت حجمی ۱۰٪ به مقدار مشخصی از Raw Egg-shell و Raw Limestone اضافه شد.

---
1. Carbide Slag
2. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy
3. X-ray Diffraction
4. Scanning Electron Microscopy

مخلوط‌های به‌دست‌آمده در دمای اتاق به‌مدت ۳۰ min و با سرعت ۵۰۰ rpm هم زده شدند. پس از اختلاط کامل ذرات و محلول اسیدی، ترکیب حاصل در آون با دمای ۱۲۰ °C خشک شدند. نمونه‌های پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با اسید استیک به‌ترتیب با Eggshell-10%acide و Lime-stone-10%acide معرفی‌شده‌اند.

مشخصه‌یابی جاذب‌ها

برای ارزیابی ساختار سطح و مورفولوژی جاذب‌های آماده‌شده از آنالیز SEM توسط دستگاه HITACHI S4800 استفاده شد که در آن تمام نمونه‌ها با یک‌لایه نازک طلا توسط دستگاه Sputter-coating Emitech K550 Telstar در ۳۰ mA به‌مدت ۳۰ s پوشش داده شدند. فاز کریستالی نمونه‌های آماده‌شده قبل از چرخه‌های کربناسیون/کلسیناسیون توسط XRD و با استفاده از پراش‌سنج Rigaku Miniflex در محدوده زاویه‌ای بین ۱۰° تا ۷۰° در ۴۰ kV و ۱۵ mA تعیین شد. با تجزیه‌وتحلیل نتایج XRD، اندازه کریستالی جاذب‌ها با استفاده از رابطه شرر به فرم زیر محاسبه شد [۲۶].

$$D = \frac{K \times \lambda}{\beta \cos\theta} \quad (۲)$$

که در آن D میانگین اندازه بلورها (nm) است و K ضریب شکل بدون بعد با مقداری نزدیک به واحد است. ضریب شکل دارای مقدار معمولی حدود ۰/۹ است، اما با شکل واقعی کریستال تغییر می‌کند. λ طول‌موج پرتوایکس است، β خطی است که در نصف شدت حداکثر برحسب رادیان گسترش می‌یابد و θ زاویه براگ برحسب درجه است. تجزیه و تحلیل FTIR برروی جاذب‌های به‌دست‌آمده از پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با اسید استیک در غلظت ۱۰٪ حجمی برای بررسی وجود گروه‌های اسیدی برروی سطح جاذب، با استفاده از دستگاه TENSOR 27 FTIR شرکت بروکر انجام شد. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن توسط پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک در حالت خام و اصلاح‌شده با اسید، و نیز و پایداری آن‌ها از آنالایزر TG ۵۵۰۰ استفاده شد که شامل بیست چرخه کربناسیون/کلسیناسیون است. وزن نمونه بارگذاری شده در TGA حدود ۱۱ mg بود که در ابتدا تا دمای ۸۰۰ °C تحت نیتروژن خالص با نرخ حرارتی ۳۰۰ min/°C گرم شد و سپس برای اطمینان از تبدیل کامل به کلسیم اکسید به‌مدت ۵ min در شرایط هم‌دما نگهداری شد. سپس مرحله کربناسیون در دمای ۶۵۰ °C به‌مدت ۵ min در حضور ۱۵٪ دی‌اکسید کربن و ۸۵٪ نیتروژن انجام شد. پس از کربناسیون کامل، محیط گازی به نیتروژن تغییر یافت و دما مجدداً با نرخ ۳۰۰ min/°C به ۸۰۰ °C افزایش یافت و سپس به‌مدت ۵ min به‌صورت هم‌دما حفظ شد تا مرحله کلسیناسیون شروع شود. این چرخه‌ها ۲۰ بار برای همه نمونه‌ها تکرار شدند. عملکرد جاذب‌های تهیه‌شده از پوسته تخم‌مرغ، سنگ‌آهک و نمونه‌های اصلاح‌شده با اسید استیک با استفاده از نتایج جذب به‌دست‌آمده از TGA و با عنوان میزان تبدیل مؤثر کربناسیون[۱]، در نمودارها نمایش داده‌شده‌اند. میزان تبدیل مؤثر کلسیم اکسید با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$X_{(eff\ CaO,\ n)} = \frac{m(t) - m}{m} \times \frac{56}{44} \quad (۳)$$

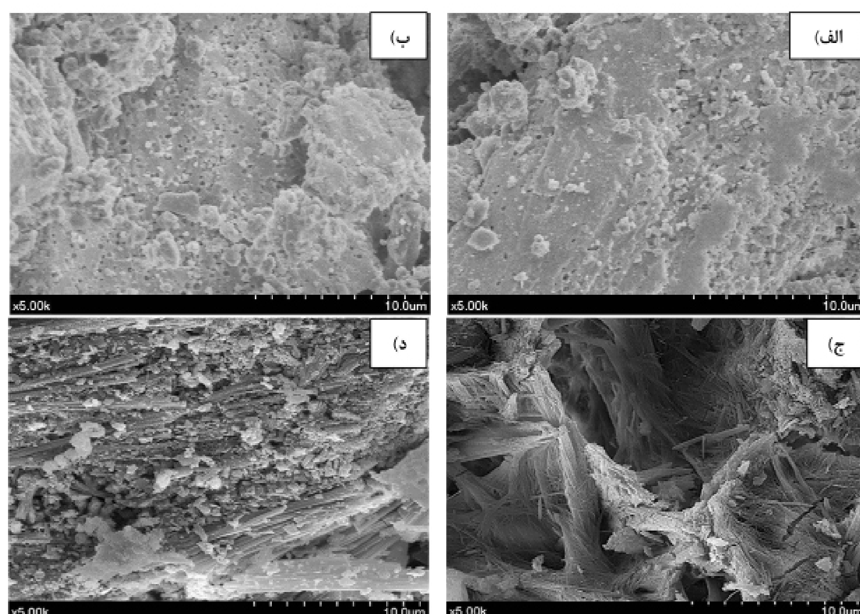
که در آن، m (t) جرم جاذب در زمان t، m جرم کل جاذب، ۵۶ و ۴۴ به‌ترتیب وزن‌های مولکولی کلسیم اکسید و دی‌اکسید کربن هستند. همچنین، مساحت ویژه با آنالیز BET با دستگاه Tristar II 3020 انجام شد.

نتایج و بحث

خصوصیات جاذب‌ها

تصاویر الکترونی روبشی پوسته تخم‌مرغ خام، سنگ‌آهک خام و همچنین نمونه‌های اسیدی شده آن‌ها، برای مطالعه مورفولوژی سطح در شکل ۳ نشان داده‌شده است.

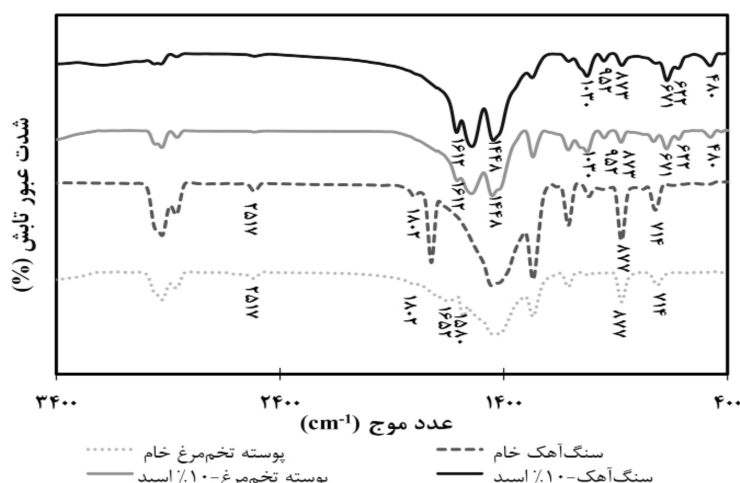
1. $X_{eff\ CaO}$



شکل ۳ تصاویر SEM نمونه های تهیه شده از الف) پوسته تخم‌مرغ خام (Raw Eggshell) ب) سنگ‌آهک خام (Raw Limestone) ج) پوسته تخم‌مرغ اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک (Eggshell-10%acide) و د) سنگ‌آهک اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک (Limestone-10%acide)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مورفولوژی ساختاری نمونه‌های خام و دارای اسید استیک کاملاً متفاوت است. پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام که عمدتاً از کلسیم کربنات تشکیل‌شده‌اند دارای کریستال‌هایی با لبه‌های تیز هستند که تخلخل کمی دارند و سطح صاف آن‌ها مشخص است؛ اما افزودن اسید استیک به پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک، منجر به تولید بلورهای استات شبیه به ستون‌های فلوت مانند با سطوح ناهموار شده است [۲۸]. با مقایسه تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های حاوی اسید در پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک (شکل ۳ ج و د) مشخص است که نمونه سنگ‌آهک ساختارهای فلوت مانند بیشتری را در مقایسه با پوسته تخم‌مرغ دارا است که علت آن را می‌توان به محتوای کلسیمی بیشتر سنگ‌آهک در قیاس با پوسته تخم‌مرغ اشاره کرد که در آنالیز عنصری هم مشهود بود. همچنین براساس نتایج آنالیز BET، سطح ویژه سنگ‌آهک خام برابر با ۸/۶ m²/g است که با سطح ویژه متناظر با پوسته تخم‌مرغ خام که ۶/۱ m²/g است، قابل‌مقایسه است. انتظار می‌رود که این تفاوت در مورفولوژی جاذب‌ها بتواند بر رفتارهای چرخه‌ای آن‌ها نیز تأثیر بگذارد، زیرا دی‌اکسید کربن از سطح ستون‌های متخلخل و فلوت مانند نسبت به یک‌لایه صلب راحت‌تر نفوذ می‌کند. طیف FTIR پوسته تخم‌مرغ خام، سنگ‌آهک خام و نمونه‌های اصلاح‌شده‌ی آن‌ها با اسید در شکل ۴ نشان داده‌شده است. این طیف‌ها تبدیل کلسیم کربنات به استات کلسیم در اثر اسیدی شدن را تائید می‌نمایند. همان‌طور که در شکل نشان داده‌شده است، مهم‌ترین پیک در cm⁻¹ ۱۵۸۰ ظاهر می‌شود که به مواد معدنی کربناته در ماتریس پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام نسبت داده می‌شود [۲۹]. دو پیک غالب دیگر که در cm⁻¹ ۷۱۴ و ۸۷۷ cm⁻¹ دیده می‌شوند، می‌توانند به‌ترتیب باحالت‌های تغییر شکل درون صفحه‌ای[1] و برون صفحه‌ای[2] مرتبط باشند که به‌طور کامل توسط بوسکا و رزینی [۳۰] توضیح داده شده‌اند. تمام پیک‌های دیگر تعیین‌شده را می‌توان به ساختار کلسیتی کلسیم کربنات که جزء اصلی پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک است نسبت داد.

1. In-Plane
2. Out-Plane



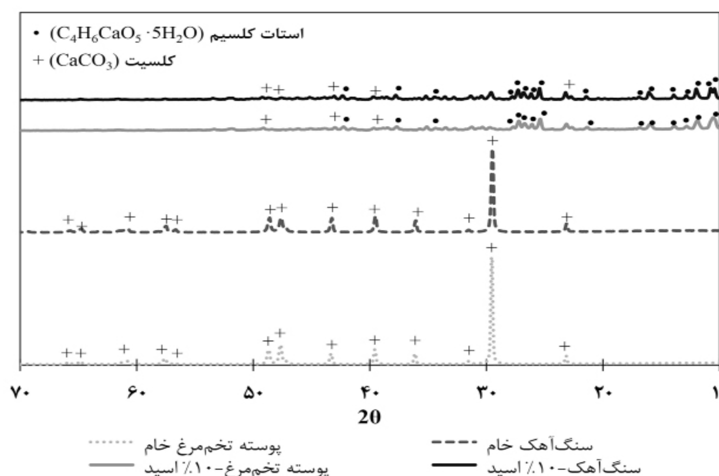
شـکل ۴ طیف FTIR پوسته تخم‌مرغ خام، سنگ‌آهک خام و پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک

مطابق شکل، اصلاح پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک با اسید استیک منجر به‌تغییرات ظاهری در الگوی طیف FTIR می‌شود که پیک‌های قابل‌توجهی را در شدت‌های $671\ cm^{-1}$، $952\ cm^{-1}$، $1030\ cm^{-1}$، $1612\ cm^{-1}$ و $1448\ cm^{-1}$ نشان می‌دهند [۳۱]. پیک موجود در $671\ cm^{-1}$ به کشش گروه عاملی COO- نسبت داده می‌شود درحالی‌که کشش مربوط به بخش C-C در استات در حدود $950\ cm^{-1}$ یافت می‌شود [۳۲]. سیگنال غالب در $1030\ cm^{-1}$ به‌تغییر شکل گروه آروماتیک C-H اختصاص داده می‌شود [۳۳]. همچنین، کشش گروه‌های CO- نیز در حدود $1600\ cm^{-1}$ دیده می‌شود. درنهایت، پیک اصلی بعدی در $1448\ cm^{-1}$ برای گروه‌های خمشی C-H یا ارتعاشات کششی آروماتیکی C=C- مرتبط است [۳۴]. استات کلسیم تجاری نیز دارای پیک‌های مشابهی می‌باشند که عمدتاً به آنیون استات مربوط می‌باشند [۳۵]. تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس برای مطالعه پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام و همچنین پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک مورداستفاده قرار گرفت و الگوهای مربوطه در شکل ۵ ارائه‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیک‌های اصلی در پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام مربوط به کلسیم کربنات است که نشان‌دهنده ساختار کریستالی کلسیت است. از سوی دیگر، پراش پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با اسید عمدتاً مربوط به استات کلسیم با مقدار بسیار کمی کلسیم کربنات است. با مقایسه الگوهای XRD پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با اسید، تشکیل استات کلسیم کاملاً واضح به نظر می‌رسد. همچنین، براساس رابطه ۲، اندازه بلور کلسیم کربنات برای پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام به‌ترتیب برابر با ۴۲/۶ nm و ۴۳/۷ nm به‌دست می‌آید و به‌طور مشابه اندازه بلور استات کلسیم برای پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک حاوی ۱۰٪ حجمی اسید استیک، به‌ترتیب برابر با ۳۰/۹ nm و ۳۹/۲ nm محاسبه شد. با مقایسه اندازه کریستالی در پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک در حضور و غیاب اسید استیک می‌توان نتیجه گرفت که سنگ‌آهک دارای اندازه کریستالی بزرگ‌تری در مقایسه با پوسته تخم‌مرغ است که همین موضوع می‌تواند به بالاتر بودن میزان جذب سنگ‌آهک دلالت داشته باشد.

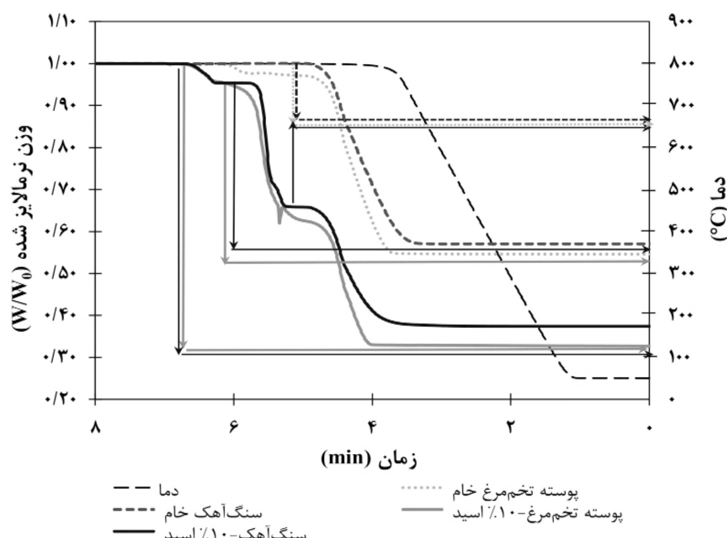
نتایج جذب دی‌اکسید کربن

الگوی افت وزنی جاذب‌ها

شکل ۶ پروفایل کاهش وزن را در طول تجزیه حرارتی برای پوسته تخم‌مرغ خام، سنگ‌آهک خام و پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک نشان می‌دهد.



شکل ۵ الگوهای XRD پوسته تخم‌مرغ خام، سنگ‌آهک خام، پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک



شکل ۶ پروفایل کاهش وزن پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام و نمونه‌های اصلاح‌شده‌ی آن‌ها با ۱۰٪ حجمی اسید استیک

برای انجام این آزمایش، هنگامی‌که نمونه‌ها در TGA قرار داده شدند، دما با نرخ ۳۰۰ min/°C در حضور نیتروژن خالص و تحت‌فشار اتمسفر تا ۸۰۰ °C افزایش یافت. همان‌طورکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، پروفایل‌های کاهش وزن پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام و همچنین جاذب‌های اسیدی شده در طول افزایش دما تفاوت‌های مهمی دارند. با توجه به نتایج، کاهش وزن در پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام در یک مرحله اتفاق می‌افتد که مربوط به کلسیناسیون کلسیم کربنات است که در دمای ۶۲۵ °C شروع‌شده و در دمای ۸۰۰ °C تکمیل می‌شود. در طی این تک مرحله، پوسته تخم‌مرغ خام حدود ۴۵٪ وزن اولیه خود را تا مقدار ۰/۵۴۷ w/w_0= و سنگ‌آهک خام نیز حدود ۴۲٪ وزن اولیه خود را تا مقدار ۰/۵۷۱ w/w_0= از دست می‌دهند که با میزان تبدیل تئوری کلسیم کربنات به کلسیم اکسید مطابقت خوبی دارد (۰/۵۶) [۳۶]. شایان‌ذکر است که کاهش وزن جزئی در ابتدای نمودار مربوط به پوسته تخم‌مرغ خام را می‌توان به جدا شدن جزئی ناخالصی‌ها از ساختار جاذب نسبت داد. درحالی‌که الگوی کاهش وزن برای استات کلسیم سه مرحله‌ای است.

اولین تجزیه در حدود ۱۰۰ °C ظاهر می‌شود که می‌توان آن را به فرآیند آبگیری نسبت داد که طی آن آب ساختاری موجود از جاذب جدا می‌شود. از دست دادن آب در نهایت منجر به تشکیل استات کلسیم بی‌آب می‌شود. این پدیده در درصد وزنی ۰/۹۹ تا ۰/۹۵ رخ می‌دهد و تقریباً ۴٪ از کل جرم ازدست‌رفته را شامل می‌شود. کاهش وزن دوم که حدود ۳۰٪ از کل کاهش را به خود اختصاص می‌دهد در دمای ۳۶۰ °C و ۳۰۰ °C به‌ترتیب برای سنگ‌آهک خام و پوسته تخم‌مرغ خام با جرم نسبی تقریبی ۰/۶۵ رخ می‌دهد که درنتیجه آن استات ایجادشده در مرحله قبل طبق واکنش (۴) تجزیه‌شده و به استون و کلسیم کربنات تبدیل می‌شود.



$$CaC_4H_6O_4 \longrightarrow CaCO_3 + C_3H_6O \qquad (۴)$$

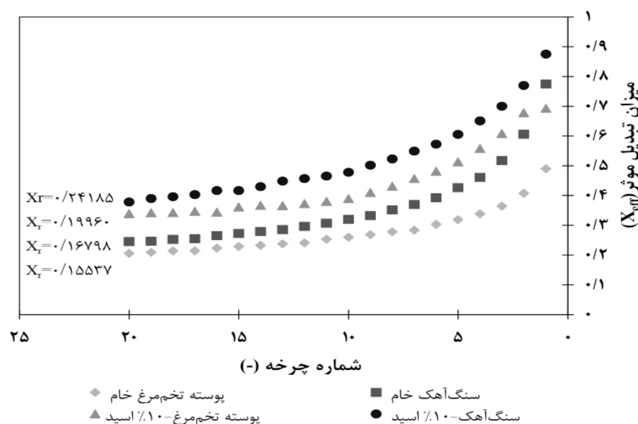
در نهایت با افزایش دما تا ۸۰۰ °C آخرین تجزیه حرارتی جاذب با w/w_0 =۰/۳۳ و w/w_0= ۰/۳۸ به‌ترتیب برای پوسته تخم‌مرغ دارای ۱۰٪ حجمی اسید استیک و سنگ‌آهک حاوی ۱۰٪ حجمی اسید استیک تکمیل می‌شود که مربوط به کلسینه شدن کلسیم کربنات و تبدیل آن به کلسیم اکسید براساس واکنش ۱ است.

ارزیابی چرخه‌های کلسیم در جذب دی‌اکسید کربن

داده‌های میزان تبدیل مؤثر پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام و جاذب‌های اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک در شرایط چرخه کلسیم در بیست چرخه در شکل ۷ نشان داده‌شده است که در آن X_{eff} میزان تبدیل مؤثر است و با رابطه ۵ محاسبه می‌شود. مزیت استفاده از تبدیل مؤثر به‌جای تبدیل کلسیم اکسید که معمولاً در مراجع استفاده می‌شود، این است که X_{eff} وجود مواد بی‌اثر را نیز در نظر می‌گیرد. درحالی‌که تبدیل عادی کلسیم اکسید عبارت است از نسبت کلسیم اکسید تبدیل‌شده به وزن اولیه کلسیم اکسید [۳۷]. اگرچه X_{eff} همیشه کم‌تر از میزان تبدیل کلسیم اکسید است، اما به‌کار بردن آن ازنظر عملیاتی بهتر است زیرا نقش حضور جامدات غیر واکنشی را نیز در نظر می‌گیرد؛ بنابراین، در این قسمت از تبدیل مؤثر برای پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام و جاذب‌های اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک استفاده‌شده است. مرحله بعدی محاسبه تبدیل مؤثر باقی‌مانده (X_r) است که درواقع همان مقدار باقی‌مانده جاذب پس از تعداد بسیار زیادی چرخه است. X_r را می‌توان با برازش رابطه زیر محاسبه کرد [۲۷]:

$$X_{effN} = X_r + \frac{X_{eff\,1}}{K\,(N-1)+\left(1-\frac{X_r}{X_{eff\,1}}\right)^{-1}} \qquad (۵)$$

که در آن، N تعداد چرخه‌ها، K ثابت نرخ فرآیند غیرفعال‌سازی، X_{eff1} و X_{effN} به‌ترتیب تبدیل‌های مؤثر در چرخه اول و چرخه آخر می‌باشند. براساس شکل ۷ که در آن تبدیل مؤثر شاخصی از مقدار دی‌اکسید کربن جذب‌شده است، واضح است.



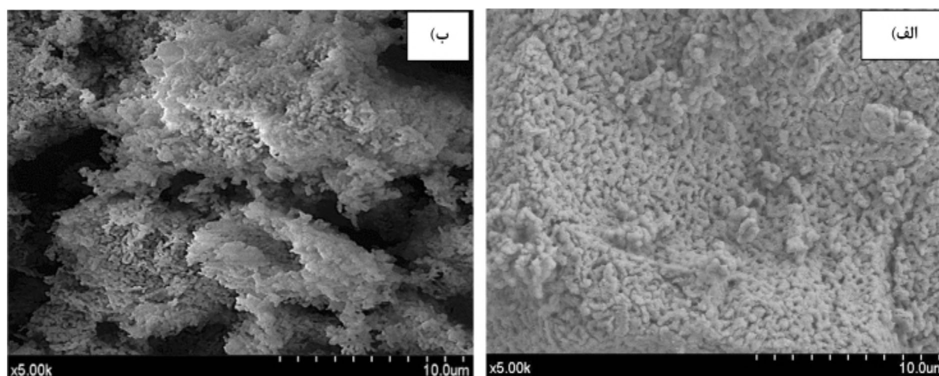
شکل ۷ میزان تبدیل مؤثر پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام و جاذب‌های حاوی ۱۰٪ حجمی اسید استیک. X_r با برازش مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

پژوهش نفت شماره ۱۲۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱۶۰-۱۴۷

که تقریباً در تمام چرخه‌ها، کربناسیون کلسیم اکسید استاتی به‌دست‌آمده از پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با اسید استیک، بیشتر از مقدار آن برای پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک خام است که نشان‌دهنده کارایی و جذب بهتر جاذب‌های اصلاح‌شده است. علاوه‌براین، روند نزولی تبدیل مؤثر برای همه نمونه‌ها آشکار و اجتناب‌ناپذیر است. دلیل اصلی کاهش میزان تبدیل را می‌توان به پدیده تف جوشی نسبت داد که در آن ذرات توسط پیوندهای شیمیایی به هم می‌چسبند و کلوخه تولید می‌کنند. سپس، در حضور نیروهای واندروالسی، کلوخه‌ها به هم می‌پیوندند و اگلومره ها را تشکیل می‌دهند [۳۸]. همه این پدیده‌های فرآیندی، سطح ویژه را کاهش می‌دهند و ازاین‌رو بر کربناسیون تأثیر می‌گذارند. هر چه سطح ویژه بالاتر باشد، عملکرد جذب کمتر تحت تأثیر تف جوشی قرار می‌گیرد. همچنین، براساس نتایج گزارش‌شده در شکل ۷، سنگ‌آهک در حضور و غیاب اسید استیک در مقایسه با پوسته تخم‌مرغ عملکرد بهتری داشته است که با نتایج گزارش‌شده در بخش SEM، مبنی بر تشکیل ساختارهای فلوت مانند بیشتر در سنگ‌آهک حاوی ۱۰٪ اسید استیک نسبت به پوسته تخم‌مرغ دارای ۱۰٪ اسید استیک همخوانی خوبی دارد. همچنین آنالیز عنصری پوسته تخم‌مرغ که نشان‌دهنده وجود سایر عناصر در کنار کلسیم، کربن و اکسیژن است در مقایسه با خلوص بالای سنگ‌آهک می‌تواند بر عملکرد بهتر سنگ‌آهک در برابر پوسته تخم‌مرغ دلالت داشته باشد. علاوه‌براین، براساس مراجع [۱۶ و ۳۹]، جاذب‌های به‌دست‌آمده از منابع طبیعی اعم از مواد معدنی و مواد تهیه‌شده از پسماندهای دورریز، از لحاظ کارایی و جذب متفاوت می‌باشند و مکان جغرافیایی، خواص ریزساختاری، ترکیب شیمیایی و نوع منبع طبیعی تأثیر بسزایی در میزان جذب جاذب‌های کلسیمی دارد.

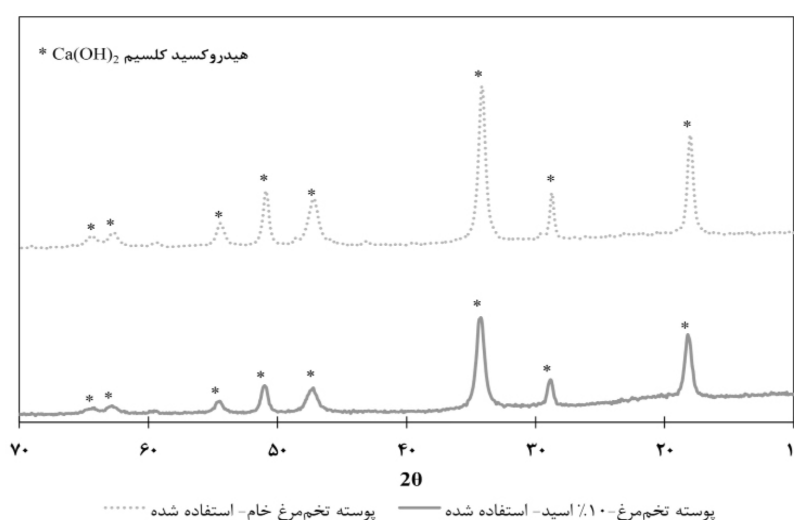
ارزیابی خصوصیات جاذب‌ها پس از چرخه‌های متوالی

تغییرات ساختاری سطح جاذب‌های استفاده‌شده نیز پس از بیست چرخه متوالی کربناسیون/ کلسیناسیون در طول فرآیند چرخه کلسیم توسط تصاویر SEM مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج برای پوسته تخم‌مرغ خام و جاذب اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک در شکل ۸ نشان داده شده است. حضور کلوخه‌های بزرگ‌تر و پدیده تف‌جوشی با مقایسه این تصاویر با تصاویر متناظر آن‌ها در شکل ۳ کاملاً مشهود است. همچنین مشخص است که پس از چرخه‌های متوالی، شکل فلوت مانند پوسته تخم‌مرغ اصلاح‌شده با اسید استیک از بین رفته و با سطوح صاف‌تر جایگزین می‌شود که می‌توانند به فروپاشی ذرات در اثر تف‌جوشی نسبت داده شود.



شکل ۸ تصاویر SEM از الف) پوسته تخم‌مرغ خام (Raw Eggshell) ب) پوسته تخم‌مرغ اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک (Eggshell-10%acide) بعد از بیست چرخه کربناسیون/ کلسیناسیون

با توجه به تفاوت‌های ساختاری جاذب‌ها قبل و بعد از فرآیند چرخه کلسیم، می‌توان ادعا کرد که این اثرات منفی می‌توانند دلیل اصلی کاهش ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن در چرخه‌های مختلف باشند، زیرا محل‌های فعال کلسیم اکسید برای واکنش با دی‌اکسید کربن به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابند. همه این نتایج مورفولوژیکی با داده‌های جذب به‌دست‌آمده از TGA سازگاری خوبی دارند. همچنین، الگوی XRD بعد از چرخه بیستم کربناسیون/کلسیناسیون برای پوسته تخم‌مرغ خام و اصلاح‌شده با اسید استیک نیز انجام شد. نتایج در شکل ۹ نشان داده‌شده است که براساس آن تمام کلسیم کربنات و گروه‌های اسیدی در پایان مرحله کلسیناسیون به کلسیم اکسید تبدیل می‌شوند. با این‌حال، به‌دلیل وجود رطوبت در جو آزمایشگاه، پیک‌های هیدروکسید کلسیم که نشان از تبدیل کلسیم اکسید در حضور رطوبت است، در الگوی XRD ظاهر شده‌اند.



شکل ۹ الگوهای XRD پوسته تخم‌مرغ خام و پوسته تخم‌مرغ اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک بعد از ۲۰ چرخه کربناسیون/کلسیناسیون

نتیجه‌گیری

جاذب‌های پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک در هر دو حالت خام و اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک به‌عنوان جاذب برای جذب دی‌اکسید کربن، در فرآیند چرخه کلسیم آماده شدند و در دستگاه TGA برای تعیین ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن مورد ارزیابی قرار گرفتند. سنگ‌آهک خام در مقایسه با پوسته تخم‌مرغ خام عملکرد بهتری ازلحاظ جذب دی‌اکسید کربن داشت به‌طوری‌که میزان تبدیل سنگ‌آهک خام ۱/۲ برابر میزان تبدیل پوسته تخم‌مرغ خام به‌دست آمد. عملکرد بهتر سنگ‌آهک را می‌توان به خلوص بالا و همچنین اندازه کریستالی بزرگ‌تر آن در مقایسه با پوسته تخم‌مرغ نسبت داد. بااین‌وجود، پوسته تخم‌مرغ به‌عنوان یک پسماند دورریز و در دسترس همچنان جذابیت فراوانی در مقایسه با سایر جاذب‌های کلسیمی دارا است. بالاترین تبدیل مؤثر کربناسیون در پایان چرخه‌ی ۲۰ ام کربناسیون/کلسیناسیون، برای پوسته تخم‌مرغ و سنگ‌آهک اصلاح‌شده با ۱۰٪ حجمی اسید استیک به‌ترتیب به میزان ۰/۳۳ و ۰/۳۸ به‌دست آمد که با مقادیر تبدیل مؤثر پوسته تخم‌مرغ خام و سنگ‌آهک خام که برابر با ۰/۲۰ و ۰/۲۴ بودند، قابل‌مقایسه می‌باشند. میزان تبدیل مؤثر باقی‌مانده برای سنگ‌آهک دارای ۱۰٪ حجمی اسید استیک در مقایسه با سنگ‌آهک خام به میزان ۴۴٪ و نسبت به پوسته تخم‌مرغ دارای ۱۰٪ حجمی اسید استیک، حدود ۲۲٪ بیشتر گزارش شد. این یافته‌ها با نتایج تصاویر SEM، مبنی بر حضور

بیشتر ساختارهای فلوت مانند در نمونه سنگ‌آهک اصلاح‌شده با اسید استیک در مقایسه با پوسته تخم‌مرغ همخوانی داشت. تفاوت مشاهده‌شده در عملکرد دو نوع مختلف جاذب مبتنی بر کلسیم شامل سنگ‌آهک و پوسته تخم‌مرغ در هر دو حالت خام و اصلاح‌شده با اسید استیک نشان داد که ماهیت جاذب و منبع تأمین آن نیز در میزان جذب تأثیرگذار است، به‌نحوی‌که سنگ‌آهک با خلوص بالای ۹۹/۵٪ نسبت به پوسته تخم‌مرغ که دارای ناخالصی‌هایی همچون سدیم، منیزیم، آلومینیم، سیلیسیم است عملکرد بهتری داشت. بهبود عملکرد هر دو جاذب سنگ‌آهک و پوسته تخم‌مرغ در حضور اسید استیک ازنظر کاربردهای عملی در فرآیند چرخه کلسیم بسیار جذاب است.

مراجع

[1]. Nobarzad, M. J., Tahmasebpoor, M., Imani, M., Pevida, C., & Heris, S. Z. (2021). Improved CO_2 adsorption capacity and fluidization behavior of silica-coated amine-functionalized multi-walled carbon nanotubes, Journal of Environmental Chemical Engineering 9: 105786, doi.org/10.1016/j.jece.2021.105786.
[2]. Oschatz, M., Antonietti, M. (2018). A search for selectivity to enable CO_2 capture with porous adsorbents, Energy and Environmental Science, 11: 57-70, doi: 10.1039/C7EE02110K.
[3]. Erans, M., Manovic, V., & Anthony, E. J. (2016), Calcium looping sorbents for CO_2 capture, Applied Energy 180: 722-742, doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.074.
[4]. Heidari, M., Tahmasebpoor, M., Mousavi, S. B., & Pevida, C. (2021). CO_2 capture activity of a novel CaO adsorbent Stabilized with (ZrO_2+Al_2O_3+CeO_2)-Based Additive under mild and realistic calcium looping conditions, Journal of CO_2 Utilization 53, 101747, doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101747.
[5]. Valverde, J. M., Jimenez, P. E. S., & Perez-Maqueda, L. A. (2014). High and stable CO_2 capture capacity of natural limestone at Ca-looping conditions by heat pretreatment and recarbonation synergy, Fuel, 123: 79-85, doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.045.
[۶]. مالکی، ن.، مطهری، ک. (۱۳۹۸) عملکرد جذب دی اکسید کربن در محلول پی زایلیلن دی آمین: اندازه‌گیری آزمایشگاهی و مدل‌سازی با استفاده از تئوری پاسخ سطح، پژوهش نفت، ۲۹(۱۰۴): ۱۴۵-۱۳۵.
[7]. Nobarzad, M. J., Tahmasebpour, M., Heidari, M., & Pevida, C. (2022). Theoretical and experimental study on the fluidity performance of hard-to-fluidize carbon nanotubes-based CO_2 capture sorbents, Frontiers of Chemical Science and Engineering, 1-16.
[8]. Nie, L., Mu, Y., Jin, J., Chen, J., & Mi, J. (2018). Recent developments and consideration issues in solid adsorbents for CO_2 capture from flue gas, Chinese Journal of Chemical Engineering, 26, 2303-2317, doi.org/10.1016/j.cjche.2018.07.012.
[9]. Troya, J. J. A., Jimenez, P. E. S., Perejón, A., Valverde, J. M., Chacartegui, R., Maqueda, L. A. P. (2020). Calcium-looping performance of biomineralized $CaCO_3$ for CO_2, Capture and Thermochemical Energy Storage, Industrial and Engineering Chemistry Research, 59: 12924-12933, doi.org/10.1021/acs.iecr.9b05997.
[10]. Ives, M., Mundy, R. C., Fennell, P. S., Davidson, J. F., Dennis, J. S., & Hayhurst, A. N. (2008). Comparison of different natural sorbents for removing CO_2 from combustion gases, as studied in a bench-scale fluidized bed, Energy Fuels, 22: 3852-3857, doi.org/10.1021/ef800417v.
[11]. Azimi, B., Tahmasebpoor, M., Jimenez, P. E. S., Perejon, A., & Valverde, J. M. (2019). Multicycle CO_2 capture activity and fluidizability of Al-based synthesized CaO sorbents, Chemical engineering journal, 358: 679-690, doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.061.
[12]. Zhang, Y., Liu, W., Yang, X., Sun, J., Hu, Y., & Xu, M. (2016). Incorporation of CaO in inert solid matrix by spray drying sol mixture of precursors, RSC Advances 6: 57658–57666, doi.org/10.1039/C6RA10958F.
[13]. Grasa, G., Murillo, R., Alonso, M., & Abanades, J. C. (2009). Application of the random pore model to the carbonation cyclic reaction, AIChE 55, 1246–55, doi.org/10.1002/aic.11746.
[14]. Imani, M., Tahmasebpoor, M., Jiménez, P. E. S., Valverde, J. M., & Moreno, V. (2022). A novel, green, cost-effective and fluidizable SiO_2-decorated calcium-based adsorbent recovered from eggshell waste for the CO_2 capture process, Separation and Purification Technology, 35, 122523, doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122523.
[15]. Hughes, R. W., Lu, D,. Anthony, E. J., & Wu, Y. (2004). Improved long-term conversion of limestone-derived sorbents for in situ capture of CO_2 in a fluidized bed combustor, Industerial and Enginerring Chemistry Research, 43, 5529-5539, doi.org/10.1021/ie034260b.
[16]. Manovic, V., Anthony, E. J. (2008). Thermal activation of CaO-Based Sorbent and Self-Reactivation during CO_2 Capture Looping Cycles, Environmental Science and Technology, 42: 4170–4174, doi.org/10.1021/es800152s.

[17]. Stendardo, S., Foscolo, P. U. (2009). Carbon dioxide capture with dolomite: a model for gas-solid reaction within the grains of a particulate sorbent, Chemical Engineering Science, 64, 2343–2352, doi.org/10.1016/j.ces.2009.02.009.
[18]. Koirala, R., Reddy, G., Lee, J. Y., & Smirniotis, P. G. (2014). Influence of foreign metaldopants on the durability and performance of Zr/Ca sorbents during high temperature CO_2 Capture, Seperation Science Technology, 49: 47–54, doi.org/10.1080/01496395.2013.836672.
[19]. Li, Y., Zhao, C., Chen, H., Duan, L., Chen, X. (2010). Cyclic CO_2 capture Behavior of $KMnO_4$-Doped CaO-Based Sorbent, Fuel, 89: 642-649, doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.041.
[20]. Heidari, M., Tahmasebpoor, M., Antzaras, A., & Lemonidou, A. A. (2020). CO_2 capture and fluidity performance of CaO-based sorbents: effect of Zr, Al and Ce additives in tri-, bi- and mono-metallic configurations, Process Safety and Environmental Protection 144: 349-365, doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.041.
[21]. Heidari, M., Mousavi, S. B., Rahmani, F., Clough, P. T., & Ozmen, S. (2022). The novel carbon nanotube-assisted development of highly porous $CaZrO_3$-CaO xerogel with boosted sorption activity towards high-temperature cyclic CO_2 capture, Energy conversion and management, 274: 116461, doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116461.
[22]. Mousavi, S. B., Heidari, M., Rahmani, F., Sene, R. A., Clough, P. T., & Ozmen, S. (2023). Highly robust ZrO_2-stabilized CaO nanoadsorbent prepared via a facile one-pot MWCNT-template method for CO_2 capture under realistic calcium looping conditions, Journal of cleaner production, 384: 135579. doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135579.
[23]. Sun, R., Xiao, R., & Ye, J. (2020). Kinetic analysis about the CO_2 Capture Capacity of Lime Mud from Paper Mill in Calcium Looping Process, Energy Science Engineering, 8: 4014-4024, doi.org/10.1002/ese3.792.
[24]. Miranda-Pizarro, J., Perejón, A., Valverde, J. M., Sánchez-Jiménez, P. E., & Pérez-Maqueda, L. A. (2016) On the Use of Steel Slag for CO_2 Capture at Realistic Calcium Looping Conditions, RSC Advances 6: 37656–37663, doi: 10.1039/C6RA03210A.
[25]. Ma, X., Li, Y., Chi, C., Zhang, W., Shi, J., & Duan, L. (2017). CO_2 capture performance of mesoporous synthetic sorbent fabricated using carbide slag under realistic calcium looping conditions, Energy and Fuels, 31: 7299–7308, doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00676.
[26]. Sun, Z., Xu, C., Chen, S., & Xiang, W. (2016). Xiang, improvements of CaO-based sorbents for Cyclic CO_2 capture using a wet mixing process, Chemical Engineering Journal, 286: 320–328, doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.051.
[27]. mani, M., Tahmasebpoor, M., Sánchez-Jiménez, P. E., Valverde, J. M., & Moreno, V. (2022). Moreno, Improvement in cyclic CO_2 capture performance and fluidization behavior of eggshell-derived $CaCO_3$ particles modified with acetic acid used in calcium looping process, CO_2 Utilization 65: 102207, doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102207.
[28]. Jiménez, P. E. S., Perejón, A., Guerrero, M. B., Valverde, J. M., Ortiz, C., & Maqueda, L. A. P. (2019). Maqueda, high-performance and low-cost macroporous calcium oxide based materials for thermochemical energy storage in concentrated solar power plants, Applied Energy, 235: 543-552, doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.131.
[29]. J. A. Dean, Lange›s Handbook of Chemistry, 1st edition, New York, McGraw-Hill, 1987, 1-1291, ISBN 0-07-016384-7.
[30]. Busca, G., & Resini, C. (2006). Vibrational spectroscopy for the analyses of geological and inorganic materials, Encyclopedia of Analytical Chemistry, 10954–11008, doi.org/10.1002/9780470027318.a5612m.
[31]. Carvalho, J., Araújo, J., & Castro, F. (2011). Alternative low-cost adsorbent for water and wastewater decontamination derived from eggshell waste: an overview, Waste Biomass Valor 2: 157–167.
[32]. Nobre, L. C., Santos, S., Palavra, A. M., Calvete, M. J., de Castro, C. A. N., Nobre, B. P. (2020). Nobre, Supercritical Antisolvent Precipitation of Calcium Acetate Fromeggshells, Supercritical Fluids, 163: 104862, doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104862.
[33]. Aracri, E., Blanco, C. D., & Tzanov, T. (2014). An enzymatic approach to develop a lignin-based adhesive for wool floor coverings, Electronic Supplementary Material (ESI) for Green Chemistry 16: 2597-2603.
[34]. Electronic Supplementary Material (ESI) for RSC Advances 2016.
[35]. Musumeci, A. W., Frost, R. L., & Waclawik, E. R. (2007). A spectroscopic study of the mineral paceite (calcium acetate), Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 67(3-4): 649-661, doi.org/10.1016/j.saa.2006.07.045.
[36]. Silaban, A., Narcida, M., & Harrison, D. P. (1992). Calcium acetate as a sorbent precursor for the removal of carbon dioxide from gas streams at high temperature, Resources, Conservation and Recycling 1: 139-153, doi.org/10.1016/0921-3449(92)90012-Q.
[37]. Sattari, F., Tahmasebpoor, M., Valverde, J. M., Ortiz, C., & Mohammadpourfard, M. (2021). Modelling of a fluidized bed carbonator reactor for post-combustion CO_2 capture considering bed hydrodynamics and sorbent

characteristics, Chemical Engineering Journal 406: 126762, doi.org/10.1016/j.cej.2020.126762.
[38]. Imani, M., Tahmasebpoor, M., Sánchez-Jiménez, P. E., Valverde, J. M., Moreno, V. (2022). Fluidization of nanoparticles: the effect of surface characteristics, The 14th International Conference On Fluidization From fundamentals To Products, doi.org/10.1016/j.cej.2020.126762.
[39]. Coppola, A., Salatino, P., Montagnaro, F. (2013). Fluidized bed calcium looping cycles for CO_2 capture under oxy-firing calcination conditions: Part 2. Assessment of dolomite vs. limestone, Chemical Engineering Journal 231: 544-549, doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.112.

راهنمای تهیه مقالات برای چاپ در مجله پژوهش نفت

مجله پژوهش نفت، مقالات علمی و پژوهشی در زمینه‌های مرتبط با صنایع نفت، گاز و پتروشیمی را برای چاپ می‌پذیرد. از پژوهشگران و کارشناسان گرامی که مایل به ارسال مقالات خود هستند، خواهشمندیم به موارد ذیل توجه فرمایند:

مقاله را از طریق وب سایت مجله به آدرس journals.ripi.ir و یا وب سایت پژوهشگاه صنعت نفت به آدرس www.ripi.ir با ثبت نام در سامانه الکترونیکی مجله ارسال نمایید.

مسؤولیت کامل مطالب و منابع چاپ شده بر عهده نویسنده یا نویسندگان خواهد بود و نسخه نهایی مقاله پیش از چاپ به امضاء نویسنده یا نویسندگان می‌رسد. نویسنده یا نویسندگان متعهد خواهند شد که مقالات ارسالی در نشریه دیگری انتشار نیافته است. **(فرم تعهد با امضاء تمام نویسندگان ارسال گردد.)**

مقالات ارسالی عودت داده نمی‌شود.

آئین نگارش فارسی باید به طور کامل رعایت شود و از به‌کار بردن اصطلاحات خارجی که معادل دقیق و پذیرفته شده در زبان فارسی دارند، خودداری شود.

مقاله باید بر روی کاغذ سفید (A4) به صورت یک خط در میان (فاصله سطرها ۱/۲ سانتی متر) توسط نرم افزار Microsoft Word ویرایش ۲۰۰۷ یا ماقبل آن تایپ و حاشیه بالا و پایین ۲/۵ سانتی متر، حاشیه چپ و راست ۲/۵ سانتی متر، لبه بالا ۲/۵ سانتی متر و لبه پایین ۱/۲۷ سانتی متر تنظیم شود.

مقاله باید شامل بخش‌های زیر باشد:

۱. عنوان: باید تا حد امکان کوتاه و کاملاً گویای موضوع مقاله باشد.

نام نویسنده یا نویسندگان باید پس از عنوان مقاله ذکر شود. نویسنده طرف مکاتبات باید با علامت * در کنار نام خود مشخص گردد.

عنوان و آدرس نویسنده یا نویسندگان و پست الکترونیکی نویسنده طرف مکاتبات مشخص شود.

۲. چکیده: باید بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ کلمه و شامل هدف از تحقیق، روش کار، مهم‌ترین یافته‌ها و نتیجه‌گیری باشد.

۳. واژه‌های کلیدی: شامل ۳ الی ۶ واژه کلیدی که نکات اصلی در مقاله را معرفی می‌کند.

۴. مقدمه: مقدمه ضمن بیان هدف تحقیق، باید حاوی خلاصه‌ای از اهمیت موضوع، نتایج مطالعات و مشاهدات مرتبط با تحقیق مورد نظر که در گذشته انجام شده است، با ذکر منابع و ماخذهای لازم آن‌ها باشد.

۵. روش کار: در این بخش لازم است روش‌های آزمایشگاهی و مواد مصرفی و تجهیزات مورد استفاده به طور کامل معرفی شود. همچنین چگونگی و روش نمونه‌گیری با دقت بیان شود و آزمون‌های آماری مورد استفاده و مراحل استنتاج آماری به خوبی تشریح گردد.

۶. نتایج و بحث: در برگیرنده نتایج حاصل از تحقیق به صورت متن، جدول، نمودار و تصویر و بحث در خصوص علل پدیده‌ها و مقایسه با یافته‌های مرتبط است.

۷. نتیجه‌گیری: در این بخش یافته‌های حاصل از تحقیق به صورت مختصر و شفاف ارائه می‌گردد.

۸. تشکر و قدردانی: در صورت لزوم از همکاری سازمان‌ها می‌شود.

۹. علائم و نشانه‌ها: فهرست علائم و نشانه‌های مورد استفاده در مقاله به ترتیب حروف الفبا به همراه واحد و شرح آن‌ها ارائه می‌شوند.

۱۰. مراجع: کلیه مراجع مورد استفاده به ترتیب ارجاع آن‌ها در متن، در این بخش ارائه می‌گردند.

۱۱. عنوان، چکیده و واژه‌های کلیدی انگلیسی: این بخش باید در صفحه‌ای جداگانه ارائه شود. تطبیق عنوان و چکیده فارسی با انگلیسی باید مورد توجه قرار گیرد. کلیه نکات مندرج در بند ۱، در ترجمه انگلیسی آن نیز رعایت می‌شود.

لطفاً در تنظیم مقالات، نکات زیر را رعایت فرمایید:

عنوان اصلی مقاله با قلم BZar شماره ۲۴ ضخیم تایپ شود.

عناوین اصلی داخل مقاله با قلم BNazanin شماره ۱۴ ضخیم و عناوین فرعی با قلم BNazanin شماره ۱۲ ضخیم تایپ شوند.

هر تیتر از متن قبلی خود با یک خط فاصله جدا شود.

متن فارسی مقاله با قلم BNazanin شماره ۱۲/۵ نازک و واژه‌ها و متن انگلیسی با قلم Times New Roman شماره ۱۰ نازک تایپ شود.

عنوان جداول و شکل‌ها با قلم BNazanin شماره ۱۱ ضخیم تایپ گردد. عنوان جداول در بالا و عنوان شکل‌ها در پایین آن‌ها نوشته می‌شود.

محتوای فارسی جداول با قلم BNazanin شماره ۱۱ نازک و عبارات انگلیسی جداول با قلم Times New Roman شماره ۹ نازک تایپ شود.

کلیه اعداد باید به‌صورت فارسی تایپ شوند.
واحد تمامی اعداد باید در سیستم SI باشد.
کلیه فرمول‌ها باید به ترتیب شماره‌گذاری شده و با استفاده از نرم‌افزار MathType تهیه شوند.
کلیه جداول و شکل‌ها در انتهای مقاله ارائه گردد. هر جدول یا شکل در یک صفحه جداگانه ارائه شود. همچنین فایل اصلی مقاله شامل متن اصلی، چکیده فارسی و لاتین، جداول و تصاویر (بدون نام نویسندگان) نیز ارسال گردد.
کلیه جداول فارسی و راست چین باشد.
کلیه شکل‌ها باید به‌صورت سیاه و سفید و کاملاً واضح ارائه شوند.
از تکرار داده‌ها به صورت چندگانه (جدول و نمودار و ...) خودداری فرمایید.
اگر شکل یا جدولی از مرجع دیگر اخذ شده باشد، شماره مرجع در انتهای عنوان شکل یا جدول درج و مشخصات آن به منابع اضافه شود.
شکل‌های مقالات به صورت فایل اصلی (در همان نرم‌افزاری که توسط آن تهیه شده‌اند مانند Excel و غیره) ارسال شود.
از به‌کار بردن واژه‌های انگلیسی در متن مقاله خودداری شود. معادل انگلیسی کلمات فارسی و نام نویسنده (گان) که برای نخستین بار در مقاله به‌کار می‌رود، به صورت زیرنویس در صفحه مربوط درج گردد. زیرنویس‌ها در هر صفحه با گذاردن شماره فارسی در گوشه بالای آخرین حرف از کلمه، در متن مشخص شوند.
در بخش چکیده نباید ارجاعی به معادلات و یا مراجع مقاله داده شود.
کلیه مراجع ذکر شده در بخش مراجع باید در متن مقاله مورد ارجاع قرار گرفته باشند. شماره‌گذاری مراجع در متن در داخل کروشه صورت می‌گیرد.
-تعداد صفحات مقاله به صورت خام (بدون قالب‌بندی) حداکثر ۱۵ صفحه تهیه گردد.

ارائه مراجع بر اساس الگوی زیر صورت می‌گیرد:
-کتاب و گزارش فارسی و خارجی:
نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال انتشار) نام کتاب، ذکر نام فصل یا فصل‌های کتاب (درصورت مطالعه و استفاده از یک یا چند فصل کتاب)، نام کتاب، شماره ویرایش کتاب، ناشر، شماره صفحات.
مثال:

1. Barrow GM (1984) Physical chemistry, (4th ed.), McGraw-Hill Inc., 1-127.

2. Spellman FR (2010) Problems facing water and wastewater treatment, Spellman's standard handbook for wastewater operators, 1st ed., Crc Press, 9-32.

3. Spellman FR (2010) Problems facing water and wastewater treatment (Chapter 1), Spellman's standard handbook for wastewater operators, 1st ed., Crc Press, 9-32.

-مقاله فارسی:
نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال) عنوان مقاله، نام مجله به طور کامل، دوره مجله، شماره مجله: شماره صفحات.
مثال‌ها:

۴. صفایی مریم.، قاسمی محمد رضا. و میرحبیبی علی. (۱۳۸۴) ساخت و بررسی ریز ساختاری پایه‌های کاتالیستی کلسیم آلومینات، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۲۴ (۲)، ۹ - ۱۸.

۵. زینل‌زاده احمد، رضایی محمد رضا. و کمالی محمد رضا (۱۳۹۲) استفاده از مدلسازی یک بعدی حوضه در مطالعه سیستم نفتی: مثالی از سنگ‌های منشا کژدمی و پابده در جنوب فروافتادگی دزفول، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۲۹، ۱۱۹-۱۰۷.

- مقاله خارجی: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال انتشار) عنوان مقاله، نام کامل مجله، دوره مجله، شماره مجله: شماره صفحات.
مثال‌ها:

6. Wang, L., & Sunden, B. (2003). Optimal design of plate heat exchangers with and without pressure drop specifications. Applied Thermal Engineering, 23(3), 295-311, doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00195-3.

7. Qiu, Z., & Zou, C. (2020). Controlling factors on the formation and distribution of "sweet-spot areas" of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology. Journal of Asian Earth Sciences,

194, 103989-103996, doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103989.
8. Soltani, B., Beiranvand, B., Moussavi-Harami, R., Honarmand, J., & Taati, F. (2020). Facies analysis and depositional setting of the upper pliocene Akchagyl Formation in southeastern Caspian Basin, NE Iran. Carbonates and Evaporites, 35, 1-18.
9. Rögl, F. (1999). Mediterranean and Paratethys, Facts and hypothesis of an Oligocene to Miocene paleogeography (short review), Geologica Carpathica, 50, 4: 339-349.
10. Robert, A. M., Letouzey, J., Kavoosi, M. A., Sherkati, S., Müller, C., Vergés, J., & Aghababaei, A. (2014). Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin. Marine and Petroleum Geology, 57, 68-87, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.05.002.

- مجموعه مقالات کنفرانس‌ها:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال برگزاری کنفرانس) عنوان مقاله، عنوان کنفرانس، محل برگزاری کنفرانس، شماره صفحات.

مثال:

۱۱. شکری قلعه س.، زرین پاشنه س. و سلطانیه م. (۱۳۷۹) مدل‌سازی و شبیه‌سازی راکتورهای چند فازی برای گوگردزدایی از سوخت دیزل، پنجمین کنگره ملی و چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، ایران.
12. Al-Thani, F. F. J., & Merna, T. (2005, March). Risk and Uncertainty Modeling in the Oil and Gas Industry. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. OnePetro.

- مقاله حاصل از کتب:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان مقاله)سال انتشار(، عنوان مقاله، عنوان کتاب، ناشر، شماره صفحات.

13. Lee, D. H., Kim, H. I., & Kim, S. S. (2004). Surface modification of polymeric membranes by UV grafting. Advanced materials for membrane separations, American Chemical Society, 281-299.

- کتب:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان مقاله)سال انتشار(،عنوان کتاب، ناشر، شماره صفحات.

۱۴. آقانباتی ع. (۱۳۸۳) انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶-۱.

- پایان‌نامه: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده (سال) عنوان پایان‌نامه، نوع پایان‌نامه، دانشگاه، کشور، شماره صفحات (در صورت امکان).

مثال:

۱۵. ابراهیمی ه (۱۳۸۳) مدل‌سازی راکتورهای ریفرمینگ متان توسط بخار آب از نوع حرارت از بالا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، ایران، ۷۱-۱.
۱۶. نبوی ج. (۱۳۸۳) گوگردزدایی بیولوژیکی زغال سنگ طبس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۴۸-۱۳.

-پایان‌نامه چاپ‌شده به زبان انگلیسی:

Author(s) (year) Title, Degree level, University/Institute, location, pp. .

17. Mack S. (2000) Desperate optimism, MA thesis, University of Calgary, Canada, 1-82.

- ثبت اختراع: نام خانوادگی حرف اول نام مخترع یا مخترعان (سال) عنوان اختراع، نوع و شماره ثبت اختراع.

مثال:

18. Baker F S (1998) Highly microporous carbon, U.S. Patent: 5710092.

.منابع اینترنتی: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال) عنوان، آدرس سایت -

مثال:

19. Arps J, Lanning B, & Dearnaley G .(2007). Maximizing a potentially significant energy source, http://www.swri.org/3pubs/ttoday/spring06/energy.html.

توجه: در بخش مراجع (References) به هیچ وجه ممکن لغت یا عبارت غیره یا بقیه نویسندگان یا "et al" به‌هیچ وجه ذکر نگردد.

توجه: در بخش مراجع مقاله و بخش چکیده تفصیلی هر مقاله ، خواهشمند است که به تعدادی از مقالات چاپ شده در مجله پژوهش نفت اشاره گردد.

فونت تمامی مراجع که به زبان انگلیسی نگارش می گردد می‌بایست Times New Roman 10 Regular باشد.

در بخش چکیده تفصیلی (Extended Abstract) فونت ها باید به صورت ذیل باشند:

بخش چکیده تفصیلی (Extended Abstract)	Font size and type
موضوع مقاله (Topic)	Times New Roman 14 Regular and Bold
نام و نام خانوادگی نویسندگان	Times New Roman 10 Regular and Bold
افیلیشن نویسندگان	Times New Roman 9 Regular and Italic
ایمیل نویسنده یا نویسندگان مسئول	Times New Roman 9 Regular
لغت Abstract	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Abstract	Times New Roman 10 Regular
لغت Keywords	Times New Roman 10 Italic and Bold
لغات Keywords	Times New Roman 10 Regular
لغت Introduction	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Introduction	Times New Roman 10 Regular
لغت Geological settings (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Geological settings (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular
لغت Materials and methods	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Materials and methods	Times New Roman 10 Regular
لغت Results and discussion	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Results and discussion	Times New Roman 10 Regular
لغت Conclusions	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Conclusions	Times New Roman 10 Regular
لغت Acknowledgment (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Acknowledgment (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular
لغت Nomenclatures (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Nomenclatures (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular
لغت References	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن References	Times New Roman 10 Regular
لغت (Appendixes)	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن (Appendixes)	Times New Roman 10 Regular
تعداد صفحات (با در نظر گرفتن شکلها و جداول)	Research Article: Maximum 5 pages including figures and tables Review Article: Maximum 9 pages including figures and tables Short communication Article (Research note): Maximum 3 pages including figures and tables
لغت Table	Times New Roman 9 Regular and Bold
متن بیانکننده جدول	Times New Roman 9 Regular
لغات، عبارات، واحدها درون هر سلول از جداول	Times New Roman 9 Regular
لغت Fig.	Times New Roman 9 Regular and Bold
متن بیان کننده شکل	Times New Roman 9 Regular
مراجع درون متن (in-text citations)	([Times New Roman 10 Regular (e.g. [1], [1,2-5], or [3,7

Petroleum Research, 2023(June-July), Vol. 33, No. 129

Comparing the Performance of Calcium-based Adsorbents Prepared from Limestone and Eggshell Resources in CO_2 Capture Calcium Looping Process and Improving their Efficiency

Mehri Imani[1], Maryam Tahmasebpoor[1]*and Pedro Enrique Sánchez-Jiménez[2]
1. Faculty of Chemical & Petroleum Engineering, University of Tabriz, Iran
2. Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, C. S. I. C.-Universidad de Sevilla, C. Américo Vespucio, Sevilla, Spain
tahmasebpoor@tabrizu.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2023.4921.3199

Received: September/21/2022 Accepted: February/08/2023

Abstract

Recently, the reduction of air pollution caused by the widespread emission of greenhouse gases such as carbon dioxide has been considered by the process of cyclic surface adsorption using calcium-based adsorbents. Despite a proper performance, the reduction of adsorption capacity due to the sintering of Ca-based adsorbents with increasing number of cycles is still a big challenge. In this study, the performance of two Ca-based adsorbents prepared from lime ore (limestone) and eggshell sources in terms of adsorption capacity during 20 consecutive carbonation and calcination cycles was investigated. Then, in order to overcome the sintering problem, both limestone and eggshell adsorbents were treated with acetic acid at a concentration of 10% by volume. The results showed that the presence of acetic acid in both types of adsorbents led to an increase in the effective conversion at the end of 20th cycle, so that the values of 0.38 and 0.33 were obtained for limestone and eggshell with 10% v/v acetic acid, respectively, which was comparable to the corresponding values for raw limestone and eggshell (in the absence of acetic acid), that is 0.24 and 0.20. The reason for the increase in the conversion by treating with acetic acid can be attributed to the formation of calcium acetate, which has led to the formation of more porous and stable structures. By comparing the two calcium sources used in this study, it was found that limestone has a better performance than eggshell in terms of CO_2 adsorption capacity, so that the conversion rate of raw limestone was 1.2 times higher than raw eggshell, which could be related to its high purity as well as its larger crystal size compared to eggshell.

Keywords: CO_2 Capture, Calcium Looping, Eggshell, Limestone, Acetic Acid.

Investigating Changes in the Concentration and Origin of Hydrocarbon Compounds in the Surface Sediments of the Coastal Strip of the Persian Gulf, in the Authority Area of Bushehr Port

Bahman Kiani Shahvandi, Ali Moghimi Kandelous*, Mozhgan Salavati and Saeid Hakimi Asiabar
Department of Geology, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran
Ali.moghimi.ks@gmail.com
DOI:10.22078/PR.2023.4981.3223

Received: December/06/2022 Accepted: March/07/2023

Abstract

Pollution of aquatic ecosystems with petroleum hydrocarbons is one of the most important issues that have become challenging in recent years. Bushehr port located in Bushehr province in the south of Iran due to its connection with the Persian Gulf and having long beaches is one of the places prone to pollution related to hydrocarbon compounds. In order to investigate the concentration of aromatic compounds in the surface sediments of Bandar Bushehr beach, 27 sediment samples were collected and subjected to GC analysis. The total amount of aromatic compounds in the coastal sediments of Bushehr port fluctuates between 206 and 1463 ng/g. The largest volume of aromatic compounds is concentrated in the northern strip of the Sahel and the middle of the Sahel, and the concentration of the compounds is low in the southern strip of the Sahel. These compounds have pyrogenic and petrogenic origin, although the contribution of petrogenic origin is more. The origin of combustion compounds is the result of sea and land transportation, municipal and domestic sewage and offshore currents carrying petroleum compounds originating from the oil fields of the Persian Gulf. Based on pollution standards, the northern and middle parts of the coastal strip of the Persian Gulf in the area of Bushehr port have a medium pollution load in relation to aromatic compounds, and in the southern parts, the pollution load is low.

Keywords: Aromatic Compounds, Sediment, Persian Gulf Coast, Bushehr.

Sub-surface Stratigraphic Correlation of the Asmari Formation in the Aghajari Oilfield, using in Reservoir Zonation

Reza Fathi Isvand[1], Reza Moussavi-Harami[1]*, Asadollah Mahboubi[1] and Ali Behdad[2]

1. Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

2. National Iranian South Oil Company (NISOC), Ahvaz, Iran

moussavi@um.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2023.4992.3226

Received: December/21/2022 Accepted: January/16/2023

Abstract

In this study, the stratigraphic correlation of the Asmari Formation in the Aghajari field is presented in a precise time framework consisting of nine timelines. The nine time-lines were obtained by using Cyclolog software and dated by the latest biozonation scheme of the Asmari Formation. Four stratigraphic packages considering their specific facies and biological characteristics were identified based on time framework and sedimentary facies studies. The previous reservoir zonation of the Asmari reservoir in Aghajari field was revised and new zonation was proposed based on time framework and geological characteristics. The Hendijan paleo-high, which is attributed to the re-activation of pre-exist basement deep-seated Hendijan fault, led to considerable changes in stratigraphic packages thickness and reservoir zones resulting in ambiguities in stratigraphic correlation and reservoir zonation. These problems were resolved by using the time framework-based new zonation.

Keywords: Time Framework, Stratigraphic Package, Reservoir Zonation, Cyclolog Software.

Photocatalytic Elimination of Methylene Blue by Nanofibrous Polystyrene Membrane Containing TiO_2 Nanotube

Nikoo Faraji, Mehdi Mahmoudian* and Asghar Zamani
Nanotechnology Department, Faculty of Chemistry, Urmia University, Iran
m.mahmoudian@urmia.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2023.5013.3234

Received: January/19/2023 Accepted: February/28/2023

Abstract

In this research, the nanofibrous polystyrene /titanium dioxide nanotube (PS/TiO_2 nanotubes) membrane was prepared by electrospinning method. In order to synthesize titanium dioxide nanotubes, the anodizing method was used. Then, the effect of different weight percentages of titanium dioxide nanotubes on the performance of the resulting membranes was investigated. The nanoparticles and nanocomposites prepared in this research were analyzed using several analyses, including fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), along with X-ray energy diffraction spectroscopy (EDS). The thermal behavior and crystal structure of prepared nanocomposite membranes were investigated using (TGA) analysis and X-ray diffraction (XRD), respectively. Afterward, in order to investigate the prepared structures, analyses such as porosity measurment, water contact angle, swelling and water flux of the membranes were performed. The photocatalytic property of the prepared membranes toward decomposition of methylene blue was investigated by two methods. The obtained results demonstrated that the dye removal was accomplished in the best way in the static method (using the membrane as an absorbent) for 48 hours. The prepared nanocomposite membranes were also used in the dye filtration removal process and the best result was obtained by using the membrane containing titanium dioxide nanotubes with the concentration, 0.05 g/(V(50).

Keywords: Nanocomposite Membrane, Electrospining, Titanium Dioxide Nanotubes, Water Treatment, Photocatalysis.

Facies Analysis, Depositional Environment and Reservoir Zonation of the Upper Part of Surmeh Formation (Arab Formation) in one of the Persian Gulf Fields

Alireza Shakeri, Somayeh Parham* and Katayoon Rezaiee Parto
Petroleum Geology Department, Geology science Division, Research Institute of Petroleum Industry(RIPI), Tehran, Iran
Parhams@ripi.ir
DOI:10.22078/PR.2023.4856.3169

Received: July/17/2022 Accepted: January/24/2023

Abstract

Surmeh Formation is one of the major reservoir formations in the Persian Gulf. In this research, facies, depositional environments, diagenetic processes and reservoir zonation are investigated in one of the fields in the Persian Gulf. Sedimentological study of the cores and thin sections of 3 wells from this field has led to the identification of 8 facies. These facies were deposited in four facies belts including supratidal, intertidal, lagoon and shoal. The sediments of this formation were deposited in a homoclinal ramp carbonate platform in arid condition. Diagenetic processes affecting these sediments include micritization, dolomitization, neomorphism, compaction, cementation, and dissolution. Among these processes, dolomitization and dissolution have a positive effect, and cementation (esp. anhydrite cement) and compaction have a negative effect on reservoir quality. Based on lithology, microfacies and poroperm data, 6 rock types have been identified. Integration of these date, caused to identity 7 reservoir zones which indicating a shallowing upward cycles. Each zone consists of one dolomite layer with fair to excellent reservoir quality witch capped by the anhydrite layer as a barrier. According to this, lithology, microfacies and diagenesis are the controlling factors of the studied interval, respectively.

Keywords: Persian Gulf, Arab Formation, Microfacies, Depositional Environment, Diagenesis, Reservoir Zonation.

Spectral Analysis of Petrophysical Logs to Determine the Stratal Surfaces of Dalan and Kangan Formation in one of the Gas Fields in Southern Iran using Wavelet Analysis and INPEFA Log

Seyedeh Azam Tayeban[1], Ali Kadkhodaie[2]*, Mehran Arian[1], Hossain Rahimpour- Bonab[3] and Seyed Mohsen Aleali[1]

1. Department of Geoscience, Faculty of Converging Science and Technologies , Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Earth Science Department, Faculty of Natural Science, University of Tabriz, Iran

3. School of Geology, College of Science, University of Tehran, Iran

kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4753.3133

Received: March/07/2022 Accepted: December/14/2022

Abstract

South Pars gas field is one of the fields in southwestern Iran in the Zagros sedimentary basin and includes two reservoirs, Kangan and Dalan. Kangan and Dalan formations that belong to Dahram group and are considered as the most important gas reservoirs in the Persian Gulf region. The use of well drilling logs in uncored wells to identify rock-related features has always been discussed by geologists. In this study, based on wavelet analysis of gamma-neutron and sonic logs, stratal surfaces including sequence boundary and maximum flooding surface were identified. In this study, using wavelet analysis of well log data such as GR, NPHI, RHOB, DT and also combining them with Cyclolog data, a suitable and low error method for automatic determination of these boundaries was presented. Also in this study, sequence stratigraphy was investigated by INPEFA method of Cyclolog software to determine sequence boundaries (SB) and maximum flooding surface (MFS) with positive inflection points and negative inflection points of available INPEFA log curves , respectively. In addition, the highstand system tract (HST) was identified by the negative trend of the INPEFA curve and the transgressive system tract (TST) was determined by the positive trend of this curve. Accordingly, sequence stratigraphy study of Dalan and Kangan formations was performed by INPEFA method in 4 wells of South Pars gas field. Finally, the agreement between the automatic sequence boundaries obtained from the wavelet transform method and INPEFA and its comparison with the core information in four wells from the study field, shows satisfactory results.

Keywords: Dalan Formation, Kangan Formation, Sequence Stratigraphy, Wavelet Analysis, Cyclolog.

The Evaluation on Pollution State of Total Petroleum Hydrocarbons in the Surrounding Sediments of Coral Ecosystems (Case study: Shivdar International Wetland)

Mehdi Soltani , Saber Ghasemi* and Ehsan Kamrani

Department of Environmental Sciences, Marine Environment Research Center, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

s.ghasemi@iau.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2023.5000.3230

Received: January/03/2023 Accepted: February/22/2023

Abstract

Shidvar wetland is located in the Persian Gulf Based on importance of coral islands as the fourth international wetland of Hormozgan province. The current research was conducted with the aim of investigating the amount of total petroleum hydrocarbons (TPHs) pollution in the sediments around the coral ecosystems of Wetland during Khordad 1401. Sediment samples were randomly collected from the depth of 0-5 cm of the seabed and the coasts of island and transferred to the laboratory according to the MOOPAM method, the concentration of TPHs was determined by UVF device in terms of micrograms per gram of sediment dry weight. The results obtained from the sediment texture analysis showed that in sea sediments, the highest to lowest percentage of silt and clay particles were observed in the third > second > first stations and in the first > third > second coastal sediments. The range of changes of sand particles in marine sediments varies from 51.57% to 52.07% and in coastal sediments from 56.76%to 68.15%. The results show that the concentration of TPHs is lower than the background value of environmental risk (4 µg/g). Generally, the reason for the presence of punctate compounds in this wetland can be considered as the 1.5km proximity of this natural ecosystem to Lavan Island, which is one of the four important areas of oil operations in the Persian Gulf and is connected with huge facilities for refining, transporting, loading and exporting crude oil. The findings of the environmental risk showed that sediments of the study area fortunately do not have any adverse biological effects on the life of aquatic organisms in this area.

Keywords: Shidvar Etland, Coral Reefs, Persian Gulf, Environmental Pollution, Total Petroleum Hydrocarbons (TPHs).

Experimental Study of the Effects of Heating Type on the Oil Produced from Iranian Oil Shale Samples

Hassan Naderi[1], Ali Shekarifard*[2] and Jaber Taheri-Shakib[1]

1. Department of Research and Technology of the Rock and Fluid Reservoirs, Research Institute of Petroleum Industry(RIPI), Tehran, Iran

2. School of Chemical Engineering, College of Engineering, Institute of Petroleum Engineering, University of Tehran, Iran

ashekary@ut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2023.4951.3206

Received: October/18/2022 Accepted: February/13/2023

Abstract

This study investigates and evaluates the effects of heating type using microwaves and conventional heating on the yield and quality of oil-shale produced from the Qalikuh reservoir with total organic carbon TOC between 3.83 and 26.4% by the weight and average 16.5% by weight. With microwaves heating, Maximum oil produced is %5.9 by weight and Based on the analysis of SARA shale oil compounds, asphaltene compounds decrease (24% by weight), saturated compounds increase (on average 40% by weight), and resinous and aromatic compounds also have fluctuating behavior. In conventional heating, Maximum oil Produced is 4.5% by weight, and the amounts of saturated compounds (about 23% by weight) and asphaltic compounds (on average 14% by weight) in shale oil decrease, but resinous compounds (about 28% by weight) decrease and compounds Aromatic values also fluctuate. The highest desulfurization in shale oil produced using microwaves was observed, The amount of nitrogen in the shale oil also decreases with the heating by microwaves finally reaches to 8% by weight. In shale oil produced by normal heating, finally sulfur decreases by 31%, nitrogen increases by 21%, and oxygen increases by 60%.

Keywords: Oil Shale, Microwave, Pyrolysis, Shale Oil, Upgrading.

Using the Improved Rain Optimization Algorithm to Simulate the Movement of Two Dominant Fluids in the Fracture and the Matrix

Hojjat Nouri* and Ali Alianvari
Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Iran
hnouri_ir@yahoo.com
DOI:10.22078/PR.2023.4953.3209

Received: October/23/2022 Accepted: February/12/2023

Abstract

Rain Optimization Algorithm (ROA) is a population-based algorithm that finds the optimal solution for complex optimization problems by simulating the movement of raindrops. By moving the raindrops towards the minimum points according to the diameter of the raindrops, this algorithm is able to find the minimum or maximum points of a function or optimization problem with acceptable speed and accuracy. In order to improve the search and discovery capabilities of this algorithm, a random search was added before starting to solve the problem by this algorithm, which is inspired by cluster bombs. Thus, before starting to optimize by ROA, random points around this raindrop are first selected and the search starts from a point that has a smaller value. For this reason, the name of the new algorithm was changed to the improved IROA rain optimization algorithm. The effectiveness of the proposed optimizer was tested through the optimization of a simulation problem in mining engineering (simulation of the movement of cement slurry in matrix and fractures) and its performance was compared with several well-known meta-heuristic algorithms. The results show that IROA is able to achieve more accurate solutions in complex optimization problems by providing faster and more efficient convergence speed compared to other successful optimizers.

Keywords: Rain Optimization Algorithm, Meta-heuristic Algorithm, Cement Slurry, Convergence Speed, Matrix.

Evaluation of Preformed Particle Gel for Conformance Control Treatment using Static and Dynamic Experiments

Mohammad Moshirpanahi, Sina Afsharpour, Mobeen Fatemi* and Mohammad Hossein Ghazanfari
Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
fatemi@sharif.edu
DOI:10.22078/PR.2022.4728.3123

Received: October/04/2022 Accepted: February/05/2023

Abstract

Injection of preformed particle gels (PPG) into fractured reservoirs is one of the most effective methods in reducing unwanted water production and increasing oil recovery. In this research, a sample of PPG has been synthesized by free radical polymerization method, and its performance for the conformance control has been evaluated. The swelling capacity of the synthesized gel has good stability against the desired conditions of temperature, salinity, pH and the presence of carbon dioxide. Also, due to the presence of hydrophilic organic groups, the interactions of oil and formation water lead to an increase in the swelling ratio of gel particles. The plugging performance of synthesized PPG samples in fractures was also investigated by the Hele-Shaw Cell system. The gel network placed in the fracture create a new porous media with far less permeability than the initial fracture. The ability of the gel to maintain the permeability of this formed porous medium depends on the flow rate and salinity of the secondary water injection, as well as the size of the gel particles. Secondary water injection into the fracture after gel placement, forms wormhole-like paths for flow of water through the gel network, and the higher the injected flow rate results in the lower resistance of the gel network against water flow. Gel particles with a matching size ratio (the ratio of the diameter of the swollen gel particles to the width of the fracture) less than 2.9, increase resistance to the water flow with increasing in their size, but the particles with a matching size ratio of 2.9 or higher, reduce the resistance to water flow due to network breakdown. Comparing this value with some of the previously published data, it seems that the critical matching size ratio is independent on gel properties and injection conditions. Finally, the effect of gel treatment in reducing water production and increasing oil recovery has been investigated in the fractured micromodel. The gel particles plugged the fracture and the secondary injected brine was sufficiently diverted towards matrix, so the oil recovery factor from matrix in subsequent water flooding increased by 65%.

Keywords: Preformed Particle Gel, Conformance Control, Swelling Capacity, Hele-Shaw Cell, Micromodel.

PETROLEUM
RESEARCH
2023 (June-July) • Volume 33 • No. 129

Contents:

Evaluation of Preformed Particle Gel for Conformance Control Treatment using Static and Dynamic Experiments
Mohammad Moshirpanahi, Sina Afsharpour, Mobeen Fatemi* and Mohammad Hossein Ghazanfari

Using the Improved Rain Optimization Algorithm to Simulate the Movement of Two Dominant Fluids in the Fracture and the Matrix
Hojjat Nouri* and Ali Anvari

Experimental Study of the Effects of Heating Type on the Oil Produced from Iranian Oil Shale Samples
Hassan Naderi, Ali Shekarifard* and Jaber Taheri-Shakib

The Evaluation on Pollution State of Total Petroleum Hydrocarbons in the Surrounding Sediments of Coral Ecosystems (Case study: Shivdar International Wetland)
Mehdi Soltani, Saber Ghasemi* and Ehsan Kamrani

Spectral Analysis of Petrophysical Logs to Determine the Stratal Surfaces of Dalan and Kangan Formation in one of the Gas Fields in Southern Iran using Wavelet Analysis and INPEFA Log
Seyedeh Azam Tayeban, Ali Kadkhodaie*, Mehran Arian, Hossain Rahimpour- Bonab and Seyed Mohsen Aleali

Facies Analysis, Depositional Environment and Reservoir Zonation of the Upper Part of Surmeh Formation (Arab Formation) in one of the Persian Gulf Fields
Alireza Shakeri, Somayeh Parham* and Katayoon Rezaiee Parto

Photocatalytic Elimination of Methylene Blue by Nanofibrous Polystyrene Membrane Containing TiO_2 Nanotube
Nikoo Faraji, Mehdi Mahmoudian* and Asghar Zamani

Sub-surface Stratigraphic Correlation of the Asmari Formation in the Aghajari Oilfield, using in Reservoir Zonation
Reza Fathi Isvand, Reza Moussavi-Harami*, Asadollah Mahboubi and Ali Behdad

Investigating Changes in the Concentration and Origin of Hydrocarbon Compounds in the Surface Sediments of the Coastal Strip of the Persian Gulf, in the Authority Area of Bushehr Port
Bahman Kiani Shahvandi, Ali Moghimi Kandelous*, Mozhgan Salavati and Saeid Hakimi Asiabar

Comparing the Performance of Calcium-based Adsorbents Prepared from Limestone and Eggshell Resources in CO_2 Capture Calcium Looping Process and Improving their Efficiency
Mehri Imani, Maryam Tahmasebpoor*and Pedro Enrique Sánchez-Jiménez

PETROLEUM RESEARCH

2023(June-July) • Volume 33 • No. 129



Address:
Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)
P.O. Box: 14665-137, Tehran, Iran
Tel: (+98 21) 4825 2129, 4825 3263
Fax: (+98 21) 4473 9712
Website: www.ripi.ir